

А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова

# ХОЛОДНАЯ ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА ПОЛЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Москва 2023 Рецензенты:

д.т.н. Романцев Борис Алексеевич, д.т.н. Лавриненко Владислав Юрьевич

Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей / Дмитриев А.М., Коробова Н.В. – М.: РАН, 2023. – с. 356, табл. 59, илл. 220.

Для усиления конкурентоспособности отечественного прессового оборудования на международном уровне целесообразно сосредоточить силы на выпуске специализированных прессов, в создании которых у отечественных прессостроителей накоплен достаточный потенциал.

Приведены сведения по разработке инновационных технологических процессов, в которых используется холодная объемная штамповка деталей из прочных сплавов и сталей, а также изготовление высокопрочных деталей как непосредственно их формованием на прессах из порошковых композиций и последующим спеканием, так и их холодной объемной штамповкой из спеченных порошковых заготовок на железной основе.

Приведены конструкции штампов и специализированных прессов, обеспечивающих расширение области производства полых осесимметричных деталей холодной объемной штамповкой.

Для инженерно-технических работников, студентов и преподавателей вузов, специализирующихся на обработке металлов давлением.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
введение	7
1. ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАССМАТРИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ	9
1.1. Особенности холодной объемной штамповки деталей из прокатанных прутковых и порошковых заготовок с позиций металловеда	9
1.2. Влияние на выбор технологии терминов, применяемых при штамповке рассматриваемых деталей	18
1.3. Особенности холодной объемной штамповки деталей из прокатанных прутковых заготовок с позиций технолога	25
1.4. Особенности холодной объемной штамповки деталей из порошков на железной основе с позиций технолога	40
2. РАЗРАБОТКА ОПЕРАЦИЙ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОІ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПРОКАТАННЫХ ПРУТКОВ	<b>ВКИ</b> 45
2.1. Механические характеристики изготавливаемых деталей	45
2.2. Силы штамповки закрытой прошивкой	56
2.3. Производство корпусов масленок	66
2.4. Штамповка стальных сдвоенных втулок	71
2.5. Закрытая прошивка заготовок при создании двухканального течения металла на первом этапе деформирования	79
2.6. Закрытая прошивка заготовок с раздачей стенок деталей	83
2.7. Холодная объемная штамповка сквозных втулок с фланцем	
2.8. Холодная штамповка конических стаканов с цилиндрической полостью	93
3. ЗАКРЫТАЯ ПРОШИВКА ЗАГОТОВОК СТУПЕНЧАТЫМИ Пулнсонами	100
	100
3.1. Особенности течения материала деформируемой заготовки	100
<ul> <li>э.г. экспериментальное исследование деформирующих</li> <li>заготовки сил</li> </ul>	109

l

3.3. Анализ напряжений в прошиваемой заготовке и в ступенчатом пуансоне
3.4. Оценка сопротивления ступенчатого пуансона усталости 133
3.5. Исследование зависимости силы закрытой прошивки заготовок от размеров пуансона с учетом радиуса галтели под ступенью
3.6. Холодная объемная штамповка вставок бандажированных матриц 144
4. РАЗРАБОТКА ОПЕРАЦИЙ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОРОШКОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ
4.1. Особенности производства спеченных заготовок для штамповки из них порошковых деталей
4.2. Снижение величин удельных сил холодной закрытой прошивки спеченных заготовок из материалов на железной основе
4.3. Штамповка высокоплотных цилиндрических порошковых заготовок на этапе, предшествующем их спеканию
<ul><li>4.4. Контроль качества высокоплотных неспеченных порошковых заготовок</li></ul>
4.5. Штамповка высокоплотных полых деталей из порошков на этапе, предшествующем их спеканию
4.6. Анализ напряжений в заготовке и удельных сил на пуансонах при штамповке высокоплотных полых деталей 207
4.7. Применение метода при исследовании операции изготовления полых тонкостенных деталей
5. КОНСТРУИРОВАНИЕ ШТАМПОВ ДЛЯ ХОЛОДНОЙ
ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ И РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ПРЕССОВ
5.1. Конструирование штампов для закрытой прошивки стальных и спеченных порошковых заготовок на универсальных прессах
5.2. Конструирование штампов для формования полых осесимметричных порошковых деталей на универсальных прессах
5.3. Нанесение инновационных покрытий на пуансоны для закрытой прошивки
5.4. Прессы для штамповки с активно направленными напряжениями контактного трения на поверхности заготовок
6. ВЫБОР И ПРИМЕНЕНИЕ ОПИСАННЫХ ВЫШЕ ОПЕРАЦИЙ В ПРОПЕССАХ ПРОИЗВОЛСТВА ЛЕТАЛЕЙ ТИПА СТАКАНОВ
С РАЗЛИЧНЫМИ ТОЛЩИНАМИ СТЕНОК
6.1. Схемы вытяжки с утонением стенки и решаемые задачи
6.2. Аналитическое исследование вытяжки с утонением стенки

6.3. Прямое выдавливание тонкостенных стаканов из толстостенных для увеличения их высоты и утонения стенки	293
6.4. Изготовление крупногабаритных порошковых стаканов на прессе для выдавливания с активно направленными напряжениями контактного трения	299
6.5. Сопоставление пределов прочности деталей, изготовленных XOШ из малоуглеродистых сталей и нелегированных железных порошков	305
6.6. Разработка технологического процесса выдавливания детали типа крупногабаритного стакана со сферическим дном и фланцем	313
6.7. Применение вальцев с фигурными полостями для формования высокоплотных изделий из порошковых сталей	326
6.8. Комбинированная холодная штамповка на специализированном прессе деталей типа тонкостенных стаканов с толстым дном	.330
6.9. Производство стаканов с фланцем в донной части холодным выдавливанием на специализированном прессе	338
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	349
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	350

### ПРЕДИСЛОВИЕ

Авторы предлагаемой монографии имеют опыт подготовки специалистов по Машинам и технологии обработки металлов давлением. Каждая из родственных кафедр в этой области знаний готовила выпускников по своим, отражающим лицо этой кафедры, специализациям. Поскольку кафедры в этой области знаний создавались в ВУЗах, расположенных в разных городах нашей Родины, выбор тех или иных специализаций для подготовки выпускников координировался с нуждами промышленных предприятий, размещенных в этих городах и территориальных областях.

Именно по таким, требующимся для промышленных предприятий региона разделам знаний, на должность заведующего кафедрой приглашался компетентный ученый. Заведующий кафедрой готовил аспирантов, которые становились кандидатами технических наук. Некоторые из аспирантов, после защиты своих диссертаций, оставались на преподавательскую работу. Они передавали студентам в первую очередь те знания, которыми овладели, выполняя под руководством заведующего кафедрой свою исследовательскую работу, в дальнейшем развиваемую ими самими. Эти знания являлись продолжением знаний заведующего кафедрой. Так формировалось лицо кафедры. В последние годы в аналогичном значении применяется термин «Научная школа». Как выходцы из научной школы с давними традициями, авторы данной монографии сочли оправданным использовать в предлагаемой монографии библиографические ссылки на публикации разных ученых, которые вышли в свет в течение продолжительного предшествующего предлагаемой публикации периода времени.

Основываясь на сказанном выше, авторы предлагаемой монографии сочли возможным даже в области только холодной объемной штамповки не охватывать весь комплекс научных и практических задач, относящихся к этой технологии. Они сконцентрировали свое внимание на решении задач, возникающих при производстве полых цилиндрических деталей (типа стаканов и втулок) из материалов на железной основе и твердых алюминиевых сплавов. В тоже время, выбрав узкий круг деталей, авторы рассмотрели их производство не только из сталей, изготавливаемых путем разлива в слитки и прокатки из них прутков, но и из сталей, получаемых методами порошковой металлургии.

В предлагаемом издании внимание сконцентрировано, в первую очередь, не на описании типовых применяемых в промышленности технологических процессов. Оно сконцентрировано на описании путей преодоления трудностей, сдерживающих расширение применения холодной объемной штамповки для производства деталей рассматриваемого типа. Читателям, интересующимися типовыми применяемыми в промышленности технологическими процессами, авторы рекомендуют обратиться к работе [1].

Данную монографию (хотя бы первый, второй и пятый или первый, четвертый и пятый ее разделы) целесообразно прочитать последовательно и полностью. Монография не предназначена для фрагментарного прочтения.

### введение

При изготовлении деталей холодной объемной штамповкой (ХОШ) или совсем не требуется последующая обработка резанием, или нужны только доводочные операции, не связанные со значительным удалением металла в отход. Коэффициент использования металла при ХОШ составляет не менее 90%. Изготовленные ХОШ детали имеют комплекс механических характеристик, отличающийся от соответствующего комплекса в прокатанном прутковом материале, из которого изготавливают заготовки для производства деталей. Говоря об изменении комплекса механических характеристик при ХОШ, можно усмотреть некоторую аналогию с закалкой, сопровождаемой высоким отпуском. При этом следует учесть, что закалка эффективна только для средне- и высокоуглеродистых сталей, поскольку связанное с ней изменение комплекса механических характеристик деталей является следствием изменения растворимости углерода в железе в зависимости от температуры нагрева стали под закалку и скорости ее последующего охлаждения. При ХОШ изменение комплекса механических характеристик деталей имеет не химическую природу, как при закалке, а природу, связанную с физикой металлов. Помимо комплекса достигаемых механических характеристик деталей, достоинство ХОШ состоит в том, что изготовленные таким способом детали имеют высокий квалитет шероховатости (малую шероховатость) их поверхности.

Несмотря на указанные достоинства ХОШ, эта технология не нашла до настоящего времени широкого применения в машиностроении. Связано это с трудностями, возникающими при разработке и реализации технологии ХОШ. Анализ этих трудностей приведен в разделе 1 данной монографии. В результате знакомства с этим анализом читатель может оценить, насколько целесообразно применять ХОШ для производства его конкретной детали в условиях предприятия, на котором он работает.

Практика показывает, что наибольшее применение ХОШ нашла в крупносерийном и массовом производстве. Принято считать, что ХОШ позволяет заменить более дорогостоящие легированные стали более дешевыми сталями 08, 10, 20 при достижении требуемого комплекса механических характеристик изготавливаемых деталей. Такие более дешевые стали наиболее доступны для машиностроительных предприятий, расположенных рядом с металлургическими комбинатами и взаимодействующих с этими комбинатами. При тесном взаимодействии с металлургами технолог-машиностроитель может влиять на качество поставляемого ему исходного материала (прутков, катанки, проволоки, используемых при ХОШ) и какие-то из операций подготовки исходного материала передать его поставщику. Например, в Магнитогорске, где расположен крупнейший металлургический комбинат, сосредоточены российские предприятия, выпускающие болты, гайки и др. детали массового метизного производства.

7

В разделах предлагаемой монографии рассмотрены операции XOШ деталей указанного в заглавии типа: при штамповке из прутковых исходных материалов и из порошковых материалов. При этом внимание уделено только инновационным операциям XOШ. К ним относятся XOШ с созданием активно направленных напряжений контактного трения между заготовкой и инструментом, XOШ с использованием комбинирования традиционных формоизменяющих операций в единую операцию. Оба названных технологических приема позволили существенно уменьшить величины давлений, действующих на осуществляющий требуемое изменение формы заготовки инструмент, и повысить сопротивление инструмента усталости.

При ХОШ деталей из порошковых материалов на железной основе реализованы операции, при которых уплотнение порошка происходит в условиях существенных сдвигов между его частицами, что позволяет значительно повысить достигаемую плотность изготовленного изделия и, таким образом, улучшить комплекс его механических характеристик, а также повысить сопротивление штампового инструмента усталости.

Формоизменяющие операции, охарактеризованные выше, требуют применения специализированного штампового, а еще более целесообразно – специализированного прессового оборудования. Поскольку ХОШ применяется в крупносерийном и массовом производстве однотипных деталей, создание такого оборудования является оправданным. Такое специализированное оборудование, изготовленное по чертежам, выполненным под руководством авторов предлагаемой монографии, и предназначенное для реализации инновационных формоизменяющих операций, описано ниже, в разделе 5.

В разделе 6 рассмотрена практическая реализация XOШ полых цилиндрических деталей. При этом, наряду с операциями XOШ, производится вытяжка изготовленных деталей, при которой осуществляется утонение их стенок при одновременном увеличении глубины их полости. Также, выдавливание изготовленных предшествующей XOШ полуфабрикатов с целью увеличения их длины при одновременном утонении их стенки. При оценке целесообразности применения XOШ учет возможностей таких дополнительных операций позволяет сделать более обоснованный вывод.

Поскольку основные положения и результаты своих проведенных исследований и разработок авторы данной монографии изложили непосредственно в тексте монографии, ссылки в перечне использованной литературы на публикации самих авторов приведены минимально.

## 1. ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАССМАТРИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

### 1.1. Особенности холодной объемной штамповки деталей из прокатанных прутковых и порошковых заготовок с позиций металловеда

Целью обработки давлением является получение остаточного формоизменения заготовки, являющейся поликристаллическим телом. Остаточное формоизменение поликристаллического тела складывается из пластической деформации его зерен (изменения их формы и размеров) и их относительного смещения. В соответствии с этим, различают внутрикристаллитную и межкристаллитную деформации поликристалла.

Деформация отдельных зерен поликристалла осуществляется скольжением или двойникованием, как и для монокристалла (зерна). Скольжение представляет собой продольное смещение тонких слоев монокристалла относительно смежных. Движение охватывает ряд плоскостей или тончайших слоев, в промежутках между которыми элементы пластической деформации отсутствуют. Скольжение в зернах происходит по определенным кристаллографическим плоскостям, которые называют плоскостями скольжения. Обычно плоскостями скольжения являются плоскости с наибольшей плотностью размещения атомов, а направлениями скольжения являются те направления, по которым межатомные расстояния имеют минимальную величину. Металловеды такие плоскости и такие направления координируют с помощью индексов Миллера и Миллера-Браве.

Двойникование представляет собой смещение атомов, расположенных в плоскостях, параллельных так называемой плоскости двойникования, на расстояния, пропорциональные расстоянию этих плоскостей от плоскости двойникования. Решетка части зерна, получившей деформацию двойникованием, является зеркальным отображением решетки недеформированной части зерна относительно плоскости двойникования (двойником). Двойникование сравнительно редко происходит при статическом нагружении заготовки. Значительно чаще оно наблюдается при деформировании заготовки ударом. Процесс скольжения осуществляется путем последовательного смещения отдельных групп атомов. Возможность относительного смещения в процессе деформации лишь части атомов, расположенных в параллельных кристаллографических плоскостях, обуславливается наличием в зерне нарушений правильного кристаллического строения. Нарушения правильности кристаллического строения приводят к тому, что в отдельных участках кристаллической решетки атомы в недеформированном зерне смещены из положений устойчивого равновесия с минимумом потенциальной энергии. Вследствие этого для перемещения отдельных групп атомов, уже смещенных из положения равновесия, могут потребоваться меньшие сдвигающие напряжения, чем при отсутствии таких смещений.

При протекании холодной пластической деформации количество нарушений правильного кристаллического строения зерен увеличивается. После некоторого критического значения количеств этих нарушений пластическая деформация требует для своего протекания уже не меньших сдвигающих напряжений по сравнению с деформацией зерен с правильной кристаллической решеткой, а больших сдвигающих напряжений. Происходит, так называемое, упрочнение зерен.

В поликристалле наличие значительного количества зерен приводит к некоторым особенностям процесса его пластической деформации [2]. Плоскости скольжения в каждом из зерен поликристалла произвольно ориентированы в пространстве. Разная их ориентация является причиной того, что при нагружении поликристаллического тела внешними силами пластическая деформация начинается не одновременно во всех зернах. В первую очередь пластическая деформация возникает в зернах с наиболее благоприятной ориентировкой плоскостей скольжения, т.е. такой, при которой последние совпадают с площадками действия наибольших по величине касательных напряжений, вызываемых действующей на заготовку системой сил. Остальные зерна деформируются упруго и могут получать лишь смещение между собой. Разная направленность плоскостей скольжения, следовательно, и разная направленность сдвигов в соседних зернах приводит к «надавливанию» одного зерна на другое. При этом на отдельных участках поверхности зерен повышается уровень действующих напряжений (возникает концентрация напряжений).

Увеличение деформации заготовки сверхзначения, соответствующего пределу текучести, приводит в ее поликристаллической структуре к тому, что зерна получают вытянутую форму в направлении наиболее интенсивного течения металла. Определенная ориентировка вытянутых в результате пластической деформации зерен называется полосчатостью структуры. Одновременно с изменением формы зерен в процессе деформации поликристалла происходит поворот кристаллографических осей отдельных зерен в пространстве. В результате при значительной деформации возникает преимущественная ориентировка кристаллографических осей зерен поликристалла, называемая текстурой деформации. Возникновение текстуры деформации приводит к анизотропии свойств поликристалла.

Таким образом, изготовленные в результате холодной пластической деформации изделия являются анизотропными, т.е. проявляющими различные физические свойства в разных направлениях.

При деформации поликристалла, как и при деформации отдельных зерен, возрастание количества внутризеренных нарушений кристаллической решетки сопровождается увеличением сопротивления заготовки пластической деформации и упрочнением металла.

Описанные выше процессы внутризеренной деформации являются основными процессами, обуславливающими изменение формы поликристаллического тела. Значительная холодная пластическая деформация может происходить в случае достаточно прочных границ зерен, когда межзеренные перемещения незначительны и играют второстепенную роль.

Однако межзеренные перемещения могут играть и значительную роль в формоизменении тела, если возникающие повреждения границ зерен «залечиваются» полностью или в значительной мере в процессе деформации. Это явление наблюдается при высоких температурах. Увеличение пластичности при нагреве до температур горячей деформации является следствием увеличения подвижности атомов. При этом в условиях горячей деформации обычно значительно возрастает пластичность межзеренных прослоек, содержащих повышенное количество примесей. Это объясняется тем, что пограничные слои с повышенным количеством примесей имеют меньшую температуру плавления, чем температура плавления зерен основного металла. Поэтому с нагревом до ковочных температур хрупкость этих прослоек уменьшается, а доля межзеренных деформаций в общей деформации образца увеличивается.

Для всех металлов и сплавов характерно, что наибольшую возможность формоизменения заготовки они имеют при температурах рекристаллизации. Рекристаллизация при пластической деформации заключается в появлении зародышей, возникновении и росте новых зерен взамен деформированных. Возможность рекристаллизации обусловлена тем, что увеличение температуры деформируемого металла поднимает энергетический потенциал атомов настолько, что последние получают возможность перегруппировок и интенсивного обмена местами.

Зародышами новых зерен становятся имеющиеся в деформируемом металле ячейки с относительно правильной, не искаженной в процессе деформации, решеткой (обломки зерен в пограничных, межзеренных слоях). К этим зародышам в соответствии с параметрами решетки пристраиваются атомы, смежные с зародышами зерен, и начинают расти новые зерна. Последние увеличиваются в размерах и с течением времени могут поглотить атомы деформированных зерен. Вследствие одинаковой возможности роста новых зерен по всем направлениям новые образующиеся из зародышей зерна имеют примерно одинаковые размеры по всем направлениям. Таким образом, деформация металла при температурах выше температуры рекристаллизации сопровождается двумя противоположно и одновременно действующими процессами: деформацией зерен (упрочнением) и их рекристаллизацией. В результате этого обработка давлением в условиях горячей деформации требует приложения к заготовке меньших деформирующих сил и позволяет получать большое формоизменение заготовки без разрушения.

В тоже время, для заготовок малых размеров трудно выдержать заданный температурный режим деформирования (учитывая охлаждение при соприкосновении с холодным инструментом и потери тепла в окружающую среду, возрастающие с ростом отношения площади поверхности заготовки к ее объему). Поэтому горячую обработку давлением обычно применяют для крупных и средних заготовок (заготовок из сортового проката массой более 0,1 кг). Необходимость штамповки заготовок малых размеров привела к развитию холодной объемной штамповки (ХОШ).

Кроме того, для металлических заготовок температуры горячей деформации соответствуют температурам интенсивного окисления их поверхностных слоев, а для углеродистых сталей – к температурам, при которых поверхностные слои обедняются углеродом. Эти обстоятельства ухудшают качество поверхности поковок, полученных горячей обработкой, и вынуждают назначать большие припуски под последующую их обработку резанием. Для сокращения обработки поковок резанием область ХОШ была расширена на производство деталей массой до 10 кг.

Стремление уменьшить силу деформирования по сравнению с холодной деформацией и в то же время улучшить качество поверхности и повысить точность изготавливаемых штампованных заготовок по сравнению с горячей штамповкой привело к тому, что в ряде случаев нашла применение так называемая полугорячая штамповка.

ХОШ имеет преимущества перед горячей в том, что отсутствует окалина, можно изготавливать штампованную деталь, имеющую минимальные припуски и нуждающуюся лишь в незначительных доводочных операциях. При ХОШ в штамповочных цехах отсутствуют нагревательные устройства и горячий металл, что существенно повышает культуру труда. Кроме того, процесс ХОШ легче механизировать и автоматизировать, чем процесс горячей штамповки. ХОШ сопровождается упрочнением материала заготовки, что также может рассматриваться как преимущество, если из малоуглеродистой стали требуется изготавливать детали, обладающие высокой прочностью.

ХОШ имеет два основных недостатка. Первый – это невысокая пластичность заготовок, поскольку рекристаллизация отсутствует, и существенные межзеренные деформации вызывают разрушение заготовки. Формоизменение, происходящее в результате внутризеренных деформаций, помимо ограничения пластичности, приводит к анизотропии механических свойств изготавливаемых штампованных деталей. Второй – очень большая величина удельной силы, которую необходимо приложить к заготовке со стороны инструмента, чтобы привести заготовку в пластическое состояние и осуществить ее формоизменение. Удельная сила определяется как сила, необходимая для деформирования заготовки, деленная на площадь сечения инструмента, перпендикулярного действию деформирующей силы. Величина удельной деформирующей заготовку силы зависит от напряжения текучести материала заготовки оз, определяемого по кривым упрочнения, рис. 1.1.



**Рис. 1.1.** Кривая упрочнения стали 10 после нагрева до 680 °С ... 700 °С, выдержки 3 ч, охлаждения с печью

Напряжение  $\sigma_s$  надо создать и поддерживать в заготовке, чтобы осуществлялось ее непрерывное формоизменение, несмотря на происходящее упрочнение ее зерен. Удельная деформирующая сила q при ХОШ определяется как произведение  $\sigma_s$  на функцию, значение которой составляет несколько единиц (для деталей рассматриваемого в монографии типа не менее 2,5). Указанная функция определена разными учеными в результате проведенных ими теоретических и экспериментальных исследований. Авторами данной монографии такие исследования тоже проведены и описаны ниже.

По оси абсцисс графика на рис. 1.1 отложена величина степени деформации заготовки. Степень деформации изменяется в ходе формоизменяющей операции, что можно строго оценить с использованием методики, приведенной в работе [1].

Несмотря на ценность рекомендации, данной в указанной работе, о необходимости учета накопления деформации по ходу внедрения пуансона в заготовку, не учтенных приведенной ниже формулой (1), эта формула дает достаточно хороший результат по оценке величины степени деформации при ХОШ деталей типа стаканов:

$$\mathbf{e} = [F_{_{3ar}} - (F_{_{3ar}} - F_{_{\Pi O I}})] / F_{_{3ar}} = d^2 / D^2 , \qquad (1)$$

где  $F_{_{3ar}}$  – площадь поперечного сечения заготовки,  $F_{_{non}}$  – площадь поперечного сечения выдавленной полости стакана, D – внешний диаметр стакана, равный диаметру заготовки, d – внутренний диаметр стакана.

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

После определения q оценивают сопротивление пуансонов усталости. На рис. 1.2 приведена кривая сопротивления усталости деформирующих заготовки пуансонов, изготовленных из сталей Р9, Р18 и Р6М5 и закаленных на 61...63 *HRC*. Эта кривая построена на основании экспертных оценок, собранных авторами данной монографии на протяжении нескольких десятков лет и приведена ранее в работе [3]. По этой кривой можно определить, во сколько раз увеличится сопротивление пуансона усталости при снижении удельной силы ХОШ, например на 10%.



Рис. 1.2. Кривая сопротивления пуансонов усталости: *q* – удельная сила; *N* – количество циклов нагружения, которое может выдержать пуансон

При попытках подвергать XOШ заготовки из среднеуглеродистых и существенно легированных сталей удельная сила, действующая на пуансон, превышает 2500 МПа, и его сопротивление усталости становится неудовлетворительным.

Будет ли возможность реализации ХОШ ограничена разрушением заготовки или недостаточным сопротивлением пуансона усталости (в предельном состоянии – его прочностью), зависит от величины гидростатического давления, при котором осуществляется требуемое формоизменение заготовки.

Гидростатическое давление – это среднее нормальное напряжение:  $\sigma_{cp} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ , которое равно одной трети первого инварианта тензора напряжений. Термин применяют, если величина  $\sigma_{cp}$  отрицательна.

Напряженное состояние, определяемое гидростатическим давлением, представляет собой всестороннее равномерное сжатие (если  $\sigma_{cp}$  отрицательно) или всестороннее равномерное растяжение. Такое напряженное состояние не может вызвать изменения формы тела, возможно лишь изменение его объема (при упругой деформации) и разрушение.

Вычитание гидростатического давления из компонентов тензора напряженного состояния точки деформируемого тела дает девиатор напряжений, который описывает изменение формы тела без изменения объема. Чем больше величина гидростатического давления, тем сильнее зерна прижаты друг к другу и тем меньше возможность протекания межзеренных деформаций. Как следствие, возможно достижение существенного формоизменения заготовки при холодной пластической деформации за счет внутризеренных деформаций без образования и развития микротрещин по границам зерен. Однако увеличение гидростатического давления приводит к увеличению удельной силы, требуемой для осуществления формоизменения, и ограничению области применения ХОШ по причине недостаточного сопротивления пуансонов усталости.

Поскольку область применения XOШ ограничивают две изложенных выше причины, введено понятие технологической деформируемости [4]. Это комплекс свойств тела, включающий деформируемость (способность формоизменения без разрушения) и общую силу при обработке давлением, которые зависят от пластичности и сопротивления материала деформации.

В данной монографии внимание сосредоточено на изготовлении полых осесимметричных деталей типа стаканов деформированием цилиндрических заготовок. При этом гидростатическое давление в деформируемой заготовке большое, и возможность деформирования ограничивается величиной q (см. рис. 1.2) и, как следствие, сопротивлением пуансонов усталости.

Чтобы уменьшить потери металла в существенные напуски и припуски у заготовок, сопровождающие их деформирование горячей объемной штамповкой, уменьшить анизотропию свойств заготовок, изготавливаемых ХОШ из металлопроката, перспективна **штамповка (формование) деталей из металлических порошков**. После штамповки порошковые заготовки подвергают спеканию. Химическую однородность отдельных частиц порошка, их размеры и кристаллическое строение обеспечить значительно проще, чем в детали, изготовленной из заготовки, отрезанной от прокатанного прутка. Спекание порошковых деталей производят в средах, защищающих поверхности отдельных частиц, а также порошковых деталей в целом, от окисления.

Другое преимущество порошковой металлургии для изготовления деталей заключается в том, что оказывается возможным получать новые технические материалы, которые нельзя или невыгодно получать другими способами. К числу преимуществ порошковой металлургии, кроме перечисленного, относится возможность использования отходов (окалина, стружка) для получения порошков.

Сказанное выше приводит к заключению, что порошковая металлургия могла бы стать одним из основных процессов производства машиностроительных деталей. Однако, до настоящего времени этого не наблюдается. Причина состоит в том, что остаточная пористость порошковых деталей является недостатком, когда изготовленная деталь должна иметь комплекс механических характеристик, сочетающий в себе одновременно высокую прочность и высокую ударную вязкость. При горячей штамповке порошковых заготовок остаточная пористость практически отсутствует, но сочетание высоких прочности и ударной вязкости не достигается, поскольку частицы порошка покрыты оксидной пленкой, что затрудняет диффузионные процессы между ними. Кроме того, при горячей штамповке увеличиваются по сравнению с холодным формованием и спеканием припуски на наружных поверхностях поковки, удаляемые последующей обработкой резанием. Указанные недостатки в сочетании с большой стоимостью металлических порошков сдерживают использование технологии порошковой металлургии в машиностроении.

Авторы данной монографии на протяжении ряда лет ведут исследования по повышению конкурентоспособности производства деталей из порошков на железной основе, что отражено ими, в частности, в работах [1, 3, 5]. Это достигается в результате разработки новых методов уплотнения порошков без нагрева, позволяющих обеспечить высокую плотность деталей. При обеспечении высокой плотности, достигаемой в результате рационально выбранных механических схем и режимов формования заготовок, повышается их электропроводность. Становится возможным проведение спекания порошковых заготовок на воздухе, путем пропускания электрического тока или его индуцирования, в течение непродолжительного времени.

С целью придания формы изготавливаемой порошковой детали и одновременного существенного уменьшения ее остаточной пористости формуют заготовку детали простейшей формы (например, цилиндрическую) спекают ее и подвергают ХОШ, как и обычную, отрезанную от прутка заготовку [1, 3, 5]. После ХОШ деталь подвергают термообработке. Операции термообработки, имеющие продолжительное время, производят в защитной газовой среде. С целью снятия остаточных напряжений производят отжиг, а для повышения прочности детали возможна закалка, если порошок легирован углеродом.

Область применения XOШ предварительно формованных и спеченных заготовок простейших форм из железного порошка, легированного добавками других металлов, ограничена. Это связано с большими удельными силами, необходимыми для деформирования заготовки в деталь и, как следствие, неудовлетворительным сопротивлением штампового инструмента, в первую очередь пуансонов, усталости.

Технологический процесс производства высокоплотных порошковых деталей непосредственно из легированных железных порошков, минуя предварительно формованные и спеченные заготовки, состоит в том, что из подготовленной порошковой шихты в закрытой матрице формуют деталь сразу окончательной формы, которую затем подвергают спеканию в защитной атмосфере и, если это требуется, без промежуточного остывания – закалке. Преимуществом этого процесса, по сравнению с описанным выше процессом, является практически неограниченная возможность легирова-

ния железного порошка порошками других металлов. Поскольку операция спекания следует после операции, выполняемой в штампе, исходное легирование железного порошка практически не влияет на величину удельной силы формования.

При формовании деталей непосредственно из легированного железного порошка с последующим спеканием необходимы меньшие удельные силы, чем при ХОШ спеченных порошковых заготовок. Однако при достижении относительной плотности, равной 83 ... 88% (точные значения зависят от марки порошка) от плотности компактного материала, в заготовке образуются расслойные трещины. Такие трещины не «залечиваются» при дальнейшем деформировании. Указанная выше невысокая плотность деталей не позволяет использовать преимущества легирования железного порошка.

Для получения высокоплотных деталей непосредственно из порошка, минуя промежуточную спеченную заготовку, необходимо осуществлять их формование в условиях, при которых в порошке происходят интенсивные сдвиги между частицами.

Для реализации в промышленности указанных выше перспективных методов уплотнения порошковых заготовок целесообразно создавать прессы, снижающие удельные силы при ХОШ спеченных заготовок или осуществляющие уплотнение при формовании деталей непосредственно из порошка сжатием, совмещенным со сдвигами между его частицами.

Обработка металлов на гидравлических прессах и результаты ее существенно отличаются от обработки на молотах. В отличие от мгновенного (ударного) действия молота, которое вызывает уплотнение поверхностного слоя металла в высокой цилиндрической заготовке, расположенной в полости матрицы, пресс создает равномерное уплотнение ее структуры по всей высоте.

Гидравлический пресс имеет и ряд других преимуществ перед молотом. Стоимость операции деформирования заготовок на гидравлических прессах меньше, чем при обработке на молотах, а коэффициент полезного действия гидравлических прессов выше. Гидравлический пресс не требует массивного фундамента и не производит больших сотрясений и шума в цехе, что неизбежно при работе молота.

В дальнейшем изложении материала в данной монографии будет **рассмотрена только штамповка на прессах**. При этом повторим сказанное выше, что при штамповке на прессах, в отличие от штамповки на молотах, изменение структуры изделия вследствие двойникования зерен практически отсутствует. Структура изменяется вследствие скольжения атомных слоев внутри зерен.

### 1.2. Влияние на выбор технологии терминов, применяемых при штамповке рассматриваемых деталей

В работе [6], посвященной операции штамповки поковок типа стаканов, сопоставлены их «прямое выдавливание» и «обратное выдавливание». Поясним эти термины с использованием рис. 1.3. На этом рисунке изображена схема выдавливания с активно направленными напряжениями контактного трения между заготовкой и матрицей, которые создаются путем перемещения матрицы *3* в направлении течения металла из деформируемой заготовки в стенку стакана со скоростью  $v_{\rm M}$ , превышающей скорость течения металла  $v_{\rm ис}$ . Показана именно такая схема, поскольку авторы данной монографии сосредоточили свое внимание на инновационных операциях ХОШ. Сначала разъясним взятые в кавычки термины в начале этого абзаца. Для этого представим себе, что используется традиционная схема деформирования заготовки в неподвижной матрице, положение которой справа от оси на рисунке аналогично показанному слева от оси.

Поскольку на рис. 1.3 пуансон I перемещается и внедряется в заготовку 2 под действием силы P, создаваемой движущимся вниз ползуном пресса, металл заготовки вытекает в зазор между пуансоном I и матрицей 3 со скоростью  $v_{nc}$ , направленной навстречу перемещению ползуна пресса. Такое деформирование заготовки называют «обратным выдавливанием» [1].



Рис. 1.3. Схема выдавливания детали типа стакана: *1* – пуансон, формирующий полость, *2* – исходная заготовка, *3* – матрица, *4* – выталкиватель (контрпуансон)

Комплект инструмента, изображенный на рис. 1.3, можно кантовать на 1800. При этом пуансон 1 станет нижним, закрепленным неподвижно, а выталкиватель (контрпуансон) 4 – верхним. При использовании того же пресса, имеющего верхнее расположение и рабочий ход вниз его ползуна, пуансон 4 будет перемещаться при рабочем ходе вниз, от действия ползуна пресса. Матрица 3 будет установлена неподвижно так, чтобы контрпуансон 4 выступал из ее полости и имел возможность достаточного перемещения внутри матрицы 3 для деформирования заготовки 2. При таком деформировании заготовки металл, обтекающий неподвижный, расположенный внизу, пуансон 1, будет течь вниз, в том же направлении, в каком перемещается ползун пресса. Такое деформирование заготовки называют «прямым выдавливанием».

В указанной выше работе [6] сделан вывод «...все данные исследования и внедрения в производство процесса обратного выдавливания полых цилиндрических изделий из сплошных заготовок в равной степени распространяются на процесс прямого выдавливания этих же изделий из сплошных заготовок».

Авторы данной монографии не согласны с авторами работы [6] и считают, что в случае применения традиционного штампа с неподвижно закрепленной матрицей деформирующая заготовку сила при «прямом выдавливании» стакана и, соответственно, энергозатраты на выполнение операции будут несколько выше, чем при «обратном выдавливании». Для объяснения этого проанализируем рис. 1.4.



Рис. 1.4. Ограниченная высота очага пластической деформации при выдавливании стакана

На рис. 1.4 видно по искажениям нанесенной на меридиональный разрез заготовки координатной сетки, что, практически независимо от глубины внедрения пуансона, пластическая деформация сосредоточена в, так называемом, очаге пластической деформации, имеющем определенную высоту.

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

При теоретических исследованиях штамповки деталей типа стаканов высота очага пластической деформации определяется из условия минимума энергозатрат на формоизменение заготовки. На расстоянии от торца пуансона, превышающем высоту очага пластической деформации, металл заготовки находится в состоянии равномерного упругого сжатия, и пластическая деформация в нем отсутствует.

Указанная часть заготовки, находящаяся в состоянии упругого сжатия, при «обратном выдавливании» находится в неподвижном по отношению к матрице, показанной на рис. 1.3, слева, положении. В тоже время, если бы рассматриваемый комплект инструмента был бы кантован на 1800 и в нем производили бы «прямое выдавливание», эта находящаяся в упругом состоянии часть заготовки проталкивалась бы контрпуансоном вдоль полости матрицы, что привело бы к дополнительным затратам энергии на преодоление контактного трения. Таким образом, различие между «обратным выдавливанием» и «прямым выдавливанием» заключается в различной доле силы контактного трения по поверхности полости матрицы в общей величине деформирующей заготовку силы. При «прямом выдавливании» доля контактного трения больше, чем при «обратном выдавливании».

При реализации приведенной на рис. 1.3. схемы выдавливания с перемещением матрицы в направлении течения металла в стенку штампуемого стакана граница между «обратным выдавливанием» и «прямым выдавливанием» стирается. В зависимости от скорости перемещения матрицы  $v_{\rm M}$ , без кантования инструмента на 1800 (для расположения выдавливающего полость в заготовке пуансона *I* вверху или внизу), могут быть реализованы контактные взаимодействия между матрицей и заготовкой, соответствующие «обратному выдавливанию» или «прямому выдавливанию».

Внимание, проявленное авторами к этим терминам, связано с тем, что в практике разработки процессов пластического формоизменения для производства деталей типа стаканов был этап, на котором существенное, превышающее объясненное выше, наблюдаемое разработчиками процессов снижение величины деформирующей заготовку силы, эти разработчики пытались объяснить изменением направления течения металла. Сравнивались направления течения металла: совпадающее с направлением и противоположное направлению перемещения ползуна пресса.

Традиционно в литературе, в том числе справочной, выдавливание поковок типа стаканов называют «обратным выдавливанием». В отличие от выдавливания деталей типа ступенчатых сплошных стержней, которое называют «прямым выдавливанием». Это связано с тем, что в применяющихся в промышленности штампах, устанавливаемых на универсальные прессы (рис. 1.5), металл заготовки вытекает в стенку штампуемой поковки типа стакана в направлении, противоположном направлению движения вниз выдавливающего полость стакана пуансона.



Рис. 1.5. Конструкция штампа для обратного выдавливания: *I* – верхняя плита, *2* – пуансонодержатель, *3* – формирующий полость стакана пуансон, *4* – съемник с пуансона 5, 6 – шпилька и гайка, ограничивающие подъем матрицы, 7 – центрирующая матрицу подвижная плита, *8* – направляющая колонка, *9* – матрица, *10* – нижняя плита, *11* – набор пружин, способствующих перемещению матрицы при выдавливании

Заметим, что показанный на рис. 1.5 штамп применяется для выдавливания заготовок из алюминиевого сплава, оказывающего небольшое сопротивление пластической деформации, поскольку в этой конструкции штампа нижний торец выдавливаемого стакана имеет не очень прочную опору о незакаленную плиту 10.

В штампах для выдавливания деталей из стальных заготовок, устанавливаемых на универсальные прессы, нижний пуансон часто опирают на ступень в полости матрицы, как показано на рис. 1.6.

Требование показанной на рисунке опоры нижнего пуансона на ступень в матрице связано с трудностью опоры его при ХОШ стальных заготовок на нижнюю плиту штампа 4. Под этой плитой в столе пресса традиционной конструкции имеется отверстие большого диаметра, и при недостаточном диаметре D прокладки, на которую опирается инструмент (нижний пуансон или матрица), прокладка деформирует нижнюю плиту штампа. Помимо задания достаточно большой величины диаметра D прокладки, задают существенную ее толщину, чтобы не допустить влияния упругого прогиба прокладки на напряженное состояние опирающегося на нее инструмента. Особенно это важно, если на нижнюю плиту штампа через прокладку 3 опирается не матрица I, как показано на рис. 1.6, а непосредственно нижний пуансон, как показано на рис. 1.5. Прокладку 3 изготавливают из легированной стали, закаленной на 57 ... 59 *HRC*.



**Рис. 1.6.** Опора нижнего пуансона о матрицу в штампах с жестко закрепленной (неподвижной) матрицей

При применении конструкции штампа с подвижной матрицей (см. рис. 1.5), в котором показанная на рис. 1.6 опора пуансона о ступень матрицы отсутствует, ниже, в комментарии к рис. 2.10, приведен несложный расчет для оценки диаметра *D* закаленной прокладки между нижней плитой штампа и торцом нижнего пуансона.

Несмотря на описанное в данной монографии выше знакомое технологам сопоставление «обратного выдавливания» и «прямого выдавливания» детали типа стакана, к этой проблеме вернулись при рассмотрении штамповки детали в виде стакана, имеющего коническую расширяющуюся придонную часть, рис. 1.7.

Термин «прямое выдавливание» в работе [7] применен при описании операции штамповки изображенных на рис. 1.7 поковок с использованием штампа, схема которого приведена на рис. 1.8.

Сообщено, что приведенную в работе [7] схему «прямого выдавливания» японский исследователь М. Куноги опубликовал в 1966 г. при описании своих работ по холодному выдавливанию стаканов из стали. Отмечено, что сила штамповки при такой схеме снижается в 1,5 и более раз по сравнению со штамповкой рассматриваемых деталей по схеме «обратного выдавливания».



Рис. 1.7. Стаканы с конической придонной частью

Показанная на рис. 1.8 схема привлекала к себе значительный интерес исследователей и технологов [8-14]. Характерно, что авторы посвященных исследованию этой схемы работ сосредоточили свое внимание на том, что снижение необходимой деформирующей заготовку силы происходит непременно при течении металла в направлении перемещения ползуна пресса (при «прямом выдавливании»). Это нашло отражение в заглавиях их публикаций. В этих публикациях описано, что при использовании штампа, созданного по схеме, приведенной на рис. 1.8, сила выдавливания меньше, чем при «обратном выдавливании».

Необходимость, по мнению авторов указанных публикаций, осуществления именно «прямого выдавливания» привела к созданию конструкции промышленного штампа [15], схематично показанной на рис. 1.9.

В этом штампе заготовка устанавливается на съемник с пуансона 2. При ходе ползуна пресса вниз матрица 4, установленная на верхней плите 6, опускается по направляющей 8 до упора в нижнюю часть штампа, при этом образуется постоянный зазор между коническими поверхностями пуансона 1 и матрицы 4. Одновременно с этим заготовка пуансоном 5 проталкивается в участок полости матрицы меньшего диаметра. При дальнейшем ходе ползуна пресса пуансон 5, опускаясь внутри верхнего участка полости матрицы 4, выдавливает заготовку в зазор между пуансоном 1 и матрицей 4. При этом матрица 4 поджимается к







Рис. 1.9. Промышленный штамп для прямого выдавливания рассматриваемых деталей

нижней части штампа силами трения между деформируемой заготовкой и участком полости матрицы меньшего диаметра, а на заключительной стадии выдавливания – также пружинами 7. При возвратном ходе ползуна пресса штампованная поковка 3 снимается с пуансона 1 съемником 2.

Штампы, созданные по схеме, приведенной на рис. 1.9, были изготовлены и прошли апробацию на нескольких машиностроительных заводах. При этом возникли проблемы. Причина их заключалась в том, что штампы устанавливали на универсальные прессы, не имевшие выталкивателей, расположенных в ползунах. Поэтому невозможно было вытолкнуть штампованную поковку 3, застрявшую в матрице 4. Обязательным условием серийного производства являлось нахождение при открытии штампа поковки 3 на пуансоне 1. Этому было уделено большое внимание технологов. Тем не менее, поковка оставалась на пуансоне не всегда. Это приводило к остановке производственного процесса и демонтажу матрицы с целью извлечения из нее застрявшей поковки.

В целом, вопрос о влиянии направления течения металла при штамповке стаканов на силу выдавливания остался незакрытым. В частности, в 2012 г. была опубликована работа [16], в которой запатентован способ выдавливания, приведенный на рис. 1.8. Авторы этого патента изменили термин и назвали операцию «продольно-поперечным выдавливанием», целью которого, как и в способе, приведенном в работе [7], является снижение величины деформирующей заготовку силы.

Для исключения влияния терминов целесообразно обратиться к учебнику [2], написанному классиками прикладной науки обработки давлением в машиностроении. Этот учебник в период с 1957 по 1977 гг. был издан четыре раза издательством «Машиностроение» значительными тиражами. Также он был издан на китайском, немецком и польском языках. В 1974 г. за этот учебник его авторы были удостоены Государственной премии СССР.

В учебнике авторы называют выдавливанием операцию, при которой «происходит истечение металла, заключенного в замкнутую полость, через отверстие в ней, форма которого определяет поперечное сечение выдавленного участка деформированной заготовки». Они отмечают, что штамповка выдавливанием принципиально не отличается от процессов прессования, которые широко распространены в металлургии для производства прутков, профилей и труб из различных материалов.

Деформирование заготовки, направленное на производство поковок типа стаканов, авторы отделяют от процессов выдавливания и называют «закрытой прошивкой». Закрытая прошивка заготовки отличается от открытой прошивки тем, что исходная сплошная заготовка перед прошивкой помещается в матрицу.

Исходя из вышеизложенной проблемы, возникшей при использовании терминов «обратное выдавливание» и «прямое выдавливание», ниже в данной монографии для всех вариантов операции, связанной со штамповкой стаканов из сплошных (непористых) заготовок применяется термин, предложенный в учебнике [2] классиками обработки давлением: «закрытая прошивка» сплошных заготовок. При штамповке спеченных порошковых заготовок (см. п. 4.2), имеющих остаточную пористость, направление течения материала заготовки, по отношению к направлению движения прошивающего полость пуансона, влияет на распределение остаточной пористости в изготовленной детали. Поэтому при рассмотрении штамповки пористых заготовок на универсальном прессовом оборудовании авторы данной монографии используют уточнение термина: закрытая прошивка (обратное выдавливание). При штамповке на специализированных прессах, описанных в разделе 5, задаваемая системой управления пресса скорость перемещения матрицы (см. рис. 4.14) обеспечивает условия трения, соответствующие как прямому, так и обратному выдавливаниям, поэтому там термин закрытая прошивка оставлен без уточнения.

### 1.3. Особенности холодной объемной штамповки деталей из прокатанных прутковых заготовок с позиций технолога

ХОШ позволяет изготавливать детали с очень высокой точностью диаметральных размеров, имеющие настолько незначительную шероховатость поверхностей, что они выглядят зеркальными. Указанные преимущества ХОШ содержат в себе и скрытые недостатки. Чтобы пояснить эти недостатки, рассмотрим для сравнения технологический маршрут изготовления деталей с помощью горячей объемной штамповки. При этом структуры изготавливаемых деталей сравнивать не будем, поскольку они были рассмотрены в пункте 1.1.

Поковки деталей, полученные горячей объемной штамповкой, как правило, имеют существенные напуски и припуски по сравнению с чертежами деталей. Эти напуски и припуски удаляют обработкой штампованной поковки резанием, всегда сопровождающей ее горячую штамповку. Обработка резанием позволяет изготовить детали, имеющие размеры с заданной их точностью, а также заданную шероховатость поверхностей деталей.

Напуски и припуски на размеры, заданные чертежом детали, при горячей штамповке поковок деталей предусматривают по следующим причинам. Это невозможность точного дозирования объема отрезаемой от прутка заготовки, необходимость удаления металла, окисляющегося или подвергающегося обезуглероживанию на поверхности заготовки при ее нагреве под штамповку, необходимость иметь технологические уклоны, облегчающие выталкивание штампованной поковки из штампа (поскольку трение на контакте с инструментом при горячей объемной штамповке существенно больше чем при ХОШ).

В тоже время, при ХОШ заготовки, максимально приближенной по форме к готовой детали, стремятся напуски и припуски сократить до минимума и, по возможности, штамповать сразу готовую деталь. При этом возникают трудности, не характерные для горячей объемной штамповки. Например, при штамповке детали типа цилиндрического стакана, имеет место проблема обеспечения заданного чертежом детали жесткого требования к соосности полости с внешней поверхностью детали. Для обеспечения такой соосности вариантом технического решения может быть направление пуансона по матрице и сопряжение направляющей части пуансона с полостью матрицы по посадке H7/h6, т.е. без гарантированного зазора. Вариант такой конструкции штампа показан на рис. 1.10 [17].



Рис. 1.10. Штамп с направлением пуансона по матрице:
1 – бандажированная матрица,
2 – пуансон, 3 – пуансонодержатель,
4 – гайка крепления пуансонодержателя,
5, 6 – сферическая опора, *z* – гарантированные зазоры при сопряжении деталей в узле пуансонодержателя

Напомним, что при обучении конструкторов-машиностроителей формулируют правило, что движущиеся относительно друг друга детали всегда сопрягают между собой по посадке с зазором. В зазор подают смазочный материал. При ином сопряжении возможны задиры поверхностей деталей, приводящие к заклиниванию механизмов. Описанная выше посадка направляющей части пуансона в матрице является исключением из этого правила. Цель такого технического решения заключается в практически полном исключении возможности появления несоосности между матрицей и пуансоном. Исключение появления задиров поверхностей достигается тем, что пуансон закаливают на твердость 61 ... 63 HRC, а матрицу – на твердость 57 ... 59 HRC. Для исключения излишних напряжений в пуансоне, имеющем строгое направление в полости матрицы, пуансон разгружают от изгиба, опирая его верхний торец на сферический подпятник, как показано на рис. 1.10, при обеспечении показанных гарантированных зазоров z.

Описанное выше исключение из правила конструирования деталей ма-

шин в конструкциях штампов является не единственным. В штампе, приведенном на рис. 1.5, и в других штампах соблюдение соосности элементов, установленных на плитах 1 и 10, обеспечивается с помощью направляющих колонок, установленных на одной из этих плит, и направляющих втулок, установленных на противоположной плите. Направляющие втулки перемещаются по направляющим колонкам с посадкой H7/h6. Как направляющие колонки, так и втулки изготавливают из стали 20, чтобы они обладали возможностью некоторого упругого изгиба без их разрушения, в частности, разрушения вследствие недостаточного их сопротивления усталости. Внешнюю поверхность колонок и внутреннюю поверхность втулок цементируют на глубину 0,8 ... 1,2 мм, чтобы они приобрели способность закаливаться, и закаливают их с использованием ТВЧ на твердость *HRC* 61 ... 63. Для лучшего перемещения при работе штампа в полостях втулок выполняют кольцевые канавки глубиной 1 ... 2 мм и шириной 3 ... 5 мм, в которых собирается смазочный материал, периодически наносимый на поверхность колонок.

В конструкции штампа, приведенной на рис. 1.10, остается нерешенным вопрос снятия штампованной детали с пуансона. Предполагается, что деталь всегда при раскрытии штампа остается в полости матрицы. Однако, даже если деталь остается на пуансоне очень редко, необходимо предусматривать съемник с пуансона. Это связано с тем, что ХОШ применяют в крупносерийном производстве деталей, и при отсутствии в конструкции штампа съемника, в случае застревания детали на пуансоне, производственный процесс останавливался.

Для обеспечения съема заготовки на направляющей части прошивающего полость в заготовке пуансона предусматривают две продольные площадки, как это показано на пуансонах, приведенных на рис. 1.11 рядом с матрицей, в которой производится ХОШ. Если рассмотреть поперечное сечение направляющей части каждого пуансона, то оно представляет собой круг, у которого удалены два симметричных сегмента. При этом расстояние между хордами удаленных сегментов незначительно превышает диаметр стержня рабочей части пуансона.

Отверстие в съемнике детали с пуансона имеет форму, аналогичную поперечному сечению направляющей части пуансона. Верхний торец штампованной цилиндрической заготовки представляет собой полный круг, без удаленных сегментов. При прохождении направляющей части пуансона через полость съемника во время возвратного хода пресса на часть площади верхнего торца штампованной поковки, равную площади двух сегментов, образовавшихся при удалении с пуансона продольных площадок, действует сила, снимающая штампованную поковку с пуансона.



Рис. 1.11. Фотография матрицы и пуансонов, сконструированных с обеспечением их направления в ее полости

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Поскольку при удалении указанных симметричных сегментов поперечное сечение направляющей части пуансона уменьшается, и рабочие напряжения в ней увеличиваются, задают больший диаметр направляющей части пуансона, чем внешний диаметр штампуемого стакана (рис. 1.12). При этом полость матрицы имеет участки двух диаметров: меньшего для оформления внешней поверхности стакана и большего для направления пуансона в ее полости. Если при изготовлении полости матрицы указанные ее участки шлифуются с одной установки в станке, они соосны между собой.



**Рис. 1.12.** Обеспечение соосности внешней и внутренней цилиндрических поверхностей детали путем направления пуансона по матрице; на схеме слева от осевой линии пуансон находится в положении перед началом деформирования заготовки, справа от осевой линии – в конце деформирования заготовки

На направляющей части пуансона для закрытой прошивки, сопряженной с полостью матрицы по посадке H7/h6, желательно выполнить неглубокие канавки в окружном направлении, имеющие достаточно большой радиус скругления и полированную поверхность, чтобы не создавать существенную концентрацию напряжений в направляющей части пуансона. Эти канавки имеют аналогию с описанными выше канавками при сопряжении направляющих колонок и втулок штампа. В эти канавки надо периодически вносить пасту MoS<sub>2</sub>. Помимо действия вносимой указанной пасты происходит смазывание поверхности направляющей части пуансона излишком мыла, расположенным поверх фосфатного покрытия заготовок и остающимся на направляющей части полости матрицы при проталкивании в матрицу фосфатированных и омыленных заготовок.

Описанное выше центрирование и направление пуансонов непосредственно в полости матрицы реализовать на практике удается редко. Это связано с необходимостью иметь для этого прессы с весьма большими ходами их ползунов. На рис. 1.10, 1.12 видно, что до начала прошивки полости в заготовке направляющая часть пуансона должна быть значительно погружена в полость матрицы, чтобы выполнить свою функцию. Это требует большой глубины полости. После завершения штамповки для извлечения из штампа деталь должна быть поднята выше верхнего торца матрицы, а нижний торец пуансона должен располагаться выше детали. Таким образом, пуансон должен совершать большой ход. Если штампуется высокая деталь, для обеспечения такой величины хода пуансона может потребоваться применение универсального пресса, имеющего требуемый ход ползуна, но, при этом, в соответствии со своей технической характеристикой, существенное превышение номинальной силы по сравнению с силой, необходимой для штамповки.

В большинстве конструкций штампов для изготовления закрытой прошивкой высоких деталей, имеющих глубокие полости, начальное центрирование пуансона относительно полости матрицы осуществляется путем правильного конструирования и тщательного изготовления плит штампа. Направление пуансона в начале его рабочего хода – посадкой между направляющими колонками и втулками штампа (см. рис. 1.5, поз. 8).

Если штампуемый стакан имеет существенную глубину полости, причиной нарушения соосности матрицы и пуансона по мере рабочего хода может явиться упругий изгиб прошивающего полость заготовки пуансона. После извлечения пуансона из полости штампованной детали он остается неискривленным, соосным полости матрицы. В тоже время, в изготовленной детали вблизи дна ее полости имеет место разностенность (рис. 1.13).

Причиной изгиба пуансона могут быть неодинаковые условия контактного трения с разных его сторон, вызванные неравномерным расходованием смазочного материала по мере внедрения пуансона в заготовку, а также неравномерная по ее диаметру структура материала заготовки.

Некоторые рекомендации по исключению упругого изгиба пуансона, осуществляющего закрытую прошивку полости в заготовке, будут приведены авторами в пунктах 2.4, 2.5 данной монографии.

Желание при ХОШ обеспечить зеркальное соответствие размеров и шероховатостей поверхностей штампуемой детали размерам и шероховатостям поверхностей штампового инструмента (пуансонов и матриц) требуют особого подхода к назначению допусков на размеры рабочих поверхностей пуансонов и матриц.



Рис. 1.13. Увеличение разностенности изготавливаемого закрытой прошивкой стакана вблизи его дна

Поясним это следующим примером. Требуется изготовить XOШ детали, показанные на рис. 1.14. Значения размеров и их допусков для двух деталей, показанных на рисунке и заданных таблично, приведены в табл. 1.



Рис. 1.14. Детали, изготавливаемые ХОШ

D h12	<i>d</i> + 0,05	$d_2$ H8	<i>d</i> <sub>3</sub> H12	$d_4$ H8	<i>L</i> h12	$l_{1} \pm 0,2$	$l_{2} \pm 0,2$	$l_{3} \pm 0,4$
19	16	12,5	5,7	7,5	30	3	2	9
35	30	26,5	18,3	20,2	48	5	4	14

Табл. 1. Размеры деталей, чертеж которых приведен на рис. 1.14

При разработке чертежа инструмента для ХОШ, действуя традиционно как при вычерчивании инструмента для горячей штамповки, конструктор матриц для изготовления рассматриваемых деталей, задавая на чертеже укажет диаметры ИХ полостей, номинальные значения, равные, соответственно, 19 и 35 мм. Этот конструктор знает, что при ХОШ соблюдаются высокие требования к точности инструмента и шероховатости его поверхности. Однако, выполняя чертежи в наиболее распространенной в метрологии системе отверстия, он укажет следующие соответствующие высокой точности размеров допуски: 19Н7 и 35Н7 при высоком квалитете шероховатости поверхности, например, *Ra*0,16. Заметим, что допуски H7 обозначают отклонения в плюс от номинальных значений диаметров.

Изготовленные в этих матрицах с помощью ХОШ детали не будут соответствовать приведенному на рис. 1.14 чертежу, где указаны размеры 19h12 и 35h12, т.е. размеры с допусками в минус от номинальных диаметров, как это характерно для охватываемых поверхностей при выполнении рабочих чертежей в традиционной метрологической системе отверстия. Несоответствие чертежу будет составлять сотые доли миллиметра. В тоже время, на практике удалить излишки в лишние сотые доли миллиметра значительно труднее, чем удалить напуски и припуски существенно большего размера на поковке, изготовленной горячей штамповкой.

Указанная трудность вызвана необходимостью использования станка, обладающего очень высокой точностью, и имеющего практически полное отсутствие биения его патрона, использования очень остро заточенного резца, а также необходимостью создания устройства для фиксации каждой обрабатываемой заготовки в патроне станка с очень высокой точностью. При этом будут потеряны основные преимущества ХОШ по сравнению с горячей объемной штамповкой при сохранении характерных для ХОШ описанных ниже высоких требований к материалу заготовки, необходимости дорогостоящего инструмента, как было указано выше, и др. трудностей.

Чтобы избежать описанной ситуации, проставляя размеры рабочих поверхностей полостей матриц в традиционной метрологической системе отверстия, рационально поступить следующим образом. Из номинальных значений 19 и 35 вычесть их заданные чертежом допуски величиной h12 (см. табл. 1). После вычитания получится, соответственно: 18,79 и 34,75. Эти значения следует указать как номинальные величины диаметров полостей матриц. К ним надо поставить допуски величиной H7, характерные для высокоточных полостей: 18,79<sup>+0,021</sup> и 34,75<sup>+0,025</sup>. Изготовленные в матрицах с такими размерами полостей штампованные детали будут соответствовать их размерам, указанным в табл. 1. При этом будет соблюдено значительно более жесткое поле допуска на их диаметры.

Почему мы не рекомендуем назначать более широкие допуски на размеры полостей матриц, хотя это позволяют сделать допуски на размеры изготавливаемых деталей? Это связано с необходимостью полировать рабочие поверхности полостей матриц для достижения шероховатости Ra0,16. Одновременно, с требованием выполнения полирования, нормально указать ширину поля допуска H7 на диаметр полируемой поверхности. При ином соотношении между допуском на размер и указанной шероховатостью обрабатываемой поверхности на машиностроительном предприятии высокого уровня представители технического контроля задержат передачу такого чертежа в производство и потребуют его исправления.

То, что допуск ужесточен в сторону наименьшего допускаемого диаметра полости матрицы, позволит при образовании, например, продольной риски на поверхности полости матрицы при ее эксплуатации провести восстановительное полирование полости с целью устранения риски. Из рассмотрения соотношения между диапазонами допусков h12 и H7 следует, что такое дополнительное полирование полости матрицы может быть проведено несколько раз. Детали, изготовленные после каждого очередного полирования полости, будут соответствовать требованиям чертежа деталей, приведенным в табл. 1.

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Размеры с допусками диаметра полости детали  $d_2$  (см. рис. 1.14) равны, соответственно, 12,5Н8 и 26,5Н8. Диаметры пуансонов, формирующих указанные полости, определяют следующим образом. К номинальным значениям  $d_4$ , равным 12,5 и 26,5 мм, добавляют максимальные значения их допуска величиной Н8. Получается, соответственно, 12,527 и 26,533. Эти подсчитанные размеры указывают на рабочих чертежах пуансонов в качестве диаметров их калибрующих поясков. Для этих диаметров проставляют допуски величиной h6, характерные для высокоточных валов: 12,527<sub>-0,011</sub> и 26,533<sub>-0,013</sub>. Полости детали, изготовленные пуансонами с такими размерами, будут соответствовать указанным в табл.1 размерам.

Ужесточенное в сторону наибольшего допускаемого диаметра пуансона поле допуска позволит при образовании риски на поверхности калибрующего пояска пуансона провести дополнительное полирование поверхности с целью устранения этой риски. Из рассмотрения соотношения величин допусков h6 и H8 следует, что такое восстановительное полирование с соблюдением допуска h6 пуансона, оформляющего полость  $d_2$  детали (имеющей заданный размер с допуском H8), может быть проведено несколько раз. Детали, изготовленные после каждого из этих восстановительных полирований поверхности пунсона, будут соответствовать требованию чертежа, приведенного на рис. 1.14.

В продолжение обсуждения вопроса о восстановительном полировании инструмента целесообразно рассмотреть, что может явиться причиной образования рисок на полированных поверхностях инструмента. При этом, в начале следует обсудить качество смазывания поверхности контакта заготовки с инструментом. Эта проблема при ХОШ значительно сложнее, чем при горячей объемной штамповке.

Среди формоизменяющих операций ХОШ смазывание заготовки при прошивке полостей глубоких стаканов является значительно более важным по сравнению со штамповкой других поверхностей деталей. Выше было показано, что ХОШ таких деталей осложняется соблюдением у них жестко заданной соосности их полости с их внешней поверхностью. Не менее важна проблема смазывания.

В направлении решения указанных двух проблем отрезанная от прутка заготовка подвергается калибровке осадкой в закрытой матрице, и ей придается форма, показанная на рис. 1.15. На верхнем торце заготовки при ее калибровке выполняется наметка, имеющая, как видно в осевом разрезе заготовки, форму усеченного конуса. Форму и размеры наметки, образуемой при калибровке заготовки, обеспечивают точно совпадающими с формой торца пуансона, который в дальнейшем будет выполнять операцию закрытой прошивки полости детали. Диаметр большего основания полости наметки совпадает с диаметром калибрующего пояска указанного пуансона. Наметка предназначена, во-первых, для лучшего центрирования пуансона на начальном этапе выполнения операции закрытой прошивки (см. также рис. 1.3, слева). Во-вторых, – для увеличения, по сравнению с плоским торцом, который имела бы заготовка без наметки, того покрытого смазочным материалом участка торцевой поверхности заготовки, площадь которого многократно увеличивается при растяжении до площади поверхности изготовленной закрытой прошивкой полости детали.



Рис. 1.15. Заготовка, калиброванная осадкой в закрытой матрице

Как будет ПОКАЗАНО НИЖе в п. 2.1, к сожалению, не всегда удается достичь растяжения без разрыва слоя смазочного материала от площади поверхности наметки на верхнем торце заготовки до площади поверхности полости детали, изготавливаемой закрытой прошивкой. В результате разрыва слоя смазочного материала возникают указанные в п. 2.1 существенные технологические проблемы.

В подписи под рис. 1.15 отмечено, что осадка производится в закрытой матрице, т.е. калибрующий заготовку пуансон с выступом для выполнения наметки имеет диаметр  $d_3$ , равный диаметру заготовки, и посадку H8/h7 по отношению к цилиндрической полости матрицы. В закрытой матрице не предусмотрено компенсатора погрешности размера  $l_3$  заготовки. Эта погрешность связана с точностью дозирования объема заготовки, отрезаемой в штампе. Она приведет к незначительному колебанию высоты стенки штампованной закрытой прошивкой детали, что должно быть устранено при следующих за закрытой прошивкой операциях технологического процесса.

Смазочный материал наносится на очищенную от оксидов, жировых и других загрязнений поверхность заготовки либо непосредственно, либо с предварительным образованием слоя носителя смазочного материала.

Процессы ХОШ закрытой прошивкой заготовок характеризуются тяжелыми условиями трения вследствие: а) высокого давления (до 2,0 ... 2,5 ГПа); б) нагрева металла при пластической деформации до 250 ... 300 °С; в) значительного относительного перемещения между деформируемым металлом и инструментом, сопровождаемого обновлением контактной поверхности между ними.

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Для исключения контакта металлов заготовки и инструмента на протяжении всего процесса деформирования толщина разделяющего их слоя смазочного материала должна быть больше расстояния между вершинами впадин и выступов на рабочей поверхности инструмента. При рекомендованных в справочной литературе шероховатостях поверхностей инструмента толщина смазывающего промежуточного слоя между заготовкой и инструментом должна быть не менее 0,1 мкм.

Для повышения адгезии смазочного материала к поверхности металла заготовки и увеличения толщины смазочного слоя заготовку перед ХОШ покрывают слоем носителя смазочного материала (покрытием). Покрытие должно удовлетворять следующим основным требованиям: высокая пластичность и прочность, термостойкость, надежное сцепление с поверхностным слоем металла заготовки, сохранение сплошности смазочного слоя по всей поверхности заготовки при ее деформировании.

Слой носителя смазочного материала образуется в результате химической или электрохимической обработки заготовки. При ХОШ заготовок из углеродистых и низколегированных (хромом, марганцем, кремнием и титаном) сталей наибольшее распространение получило фосфатирование с последующим омыливанием. В Германии, где имеются значительные природные ресурсы дисульфида молибдена, вместо омыливания, фосфатирование заготовок сопровождают их смазыванием пастой дисульфида молибдена.

Процесс фосфатирования заключается в нанесении на поверхность заготовок стойкого при высоких давлениях слоя кристаллических фосфатов. Фосфатные пленки, прочно сцепленные с основным металлом силами химических связей, служат надежной разделительной прослойкой между поверхностями инструмента и деформируемого металла. Они предотвращают явление холодного сваривания металла с инструментом. Благодаря своей пористости фосфатные покрытия хорошо впитывают смазочные материалы, прочно удерживая их на своей поверхности. Лучшие антифрикционные свойства при ХОШ заготовок из углеродистых сталей имеют покрытия фосфатами марганца и цинка [1, 18].

Для легированных сталей, содержащих никель, более 6% хрома, а также никелевых сплавов, взамен фосфатирования применяют оксалатирование (покрытие солями щавелевой кислоты) с последующим омыливанием, для алюминия и алюминиевых сплавов – анодирование и смазывание техническими животными или кашалотовыми жирами.

При оксалатировании применяют раствор, содержащий 24 г/л щавелевой кислоты, 12 г/л закисного щавелевокислого железа, 6 г/л двухромистовокислого калия. Продолжительность обработки 25 ... 30 мин, температура 60 ... 70 °C. Масса покрытия 2 ... 3 мкг на 1 м<sup>2</sup> поверхности. Рабочий раствор имеет pH 1 ... 1,5.

Анодирование (анодное оксидирование) заключается в образовании на поверхности металла пленки оксидов того же металла при электролизе, оно

осуществляется в растворе серной кислоты (190 г/л ... 200 г/л). Режим анодирования: плотность тока 0,8 ... 1 А/дм<sup>2</sup>, напряжение 11 ... 12 В, соотношение площадей анода и катода 1 ... 3, температура раствора 20 ... 25 °C, время обработки 20 ... 25 мин.

Для оценки антифрикционных свойств непосредственно слоя носителя смазочного материала, при отсутствии самого смазочного материала, авторами данной монографии был проведен следующий эксперимент. На испытательной машине, оснащенной устройством записи изменения величины деформирующей силы по ходу деформирования заготовки, производили в лабораторном штампе закрытую прошивку заготовок из алюминиевого сплава Д1 для изготовления деталей типа стаканов. Заготовки использовали в состоянии без обезжиривания их поверхности и без нанесения на них смазочного материала, с нанесением на поверхность заготовок смазочного материала, с анодированием поверхности заготовок, но без нанесения на них смазочного материала, с анодированием поверхности заготовок и нанесением на них смазочного материала. Сравнивали силы закрытой прошивки заготовок при четырех указанных выше состояниях их поверхностей при XOIII стаканов одинакового размера.

Наименьшая сила была зафиксирована при прошивке заготовок с анодированной их поверхностью и нанесенным на них смазочным материалом. Наибольшая сила – при прошивке заготовок с анодированной поверхностью при отсутствии на них смазочного материала. Таким образом, слой покрытия без нанесения на него смазочного материала только увеличивает контактное трение с инструментом по сравнению с заготовками, на которые не нанесено покрытие. Данное замечание сделано, чтобы подчеркнуть, что слой носителя смазочного материала (покрытия), хотя и разделяет между собой контактные поверхности заготовки и инструмента, не может служить заменой их смазывания.

При штамповке на автоматах операциям подготовки поверхности подвергают калиброванный прокат, при штамповке на прессах – мерные заготовки. При штамповке на автоматах после отрезки в первой позиции штучной заготовки от прутка на ее торец может быть нанесен, например, разбрызгиванием, только жидкий смазочный материал, создание на торце слоя носителя смазочного материала невозможно. Поэтому прошивка глубоких гладких полостей при штамповке на автоматах является неосуществимой по причине, объясненной выше при комментарии к рис. 1.15. Предприятия, выпускающие холодноштамповочные многопозиционные автоматы, предлагают укомплектовать их устройствами для загрузки мерных заготовок. Однако при этом автомат теряет некоторые свои преимущества по сравнению с прессом, сохраняя свои недостатки.

Сказанное выше свидетельствует о том, что при обоснованном подходе к нанесению смазочного материала на поверхности заготовок контактное трение не является причиной образования при ХОШ рисок на контактных поверхностях инструмента и заготовок.

Источник поверхностных дефектов изготавливаемых ХОШ деталей находится внутри деформируемого материала и связан с металлургическим циклом его производства, которое рассмотрено далее по тексту.

Производство стального проката состоит из трёх основных этапов: выплавка стали, литьё слитков, их прокатка. От способов и режимов осуществления этих этапов существенно зависит качество проката, поступающего на штамповку.

Сталь выплавляют в кислородных конверторах, дуговых и индукционных печах. Кислородный конвертор обеспечивает заданный уровень содержания кремния, марганца, углерода, а также ограниченное существующими нормами содержание вредных примесей (фосфора, серы, кислорода). Он особенно эффективен для производства низкоуглеродистых сталей. Для производства других сталей, в том числе легированных, применяют электроплавильные печи (дуговые и индукционные). Наилучшие показатели по пластичности, химическому составу, газонасыщенности выплавляемой стали обеспечивают индукционные печи, конструкция и принцип действия которых позволяют успешно применять практически все известные способы повышения качества, в том числе создание вакуума в печи. Содержание примесей фосфора, серы, азота в сталях, выплавленных в индукционных печах, находится в пределах 0,008 ... 0,061%.

В зависимости от степени раскисления, стали могут быть кипящими, полуспокойными и спокойными. Кипящие стали отличаются очень низким содержанием кремния, но, вследствие особенностей изготовления, для них характерно наличие большой зональной ликвации, загрязнение включениями и газовыми порами. Поэтому кипящие стали находят ограниченное применение при ХОШ. Наилучшими для ХОШ являются полуспокойные и спокойные стали, раскисленные алюминием. Наличие в стали избыточного алюминия в пределах 0,025 ... 0,05% при содержании углерода 0,08 ... 0,28% не затрудняет процесс ХОШ, пластичность таких сталей выше, чем у кипящих. Ударная вязкость изделий из раскисленных сталей в 2,5 ... 3,5 раза больше, чем у изделий из кипящих сталей, при одинаковом химическом составе. Наибольшее распространение для процессов ХОШ получили раскисленные полуспокойные стали.

Стальные слитки получают методами направленной кристаллизации при непрерывном литье или наполнительного литья в изложницу. Слитки, полученные методом направленной кристаллизации, имеют малую газонасыщенность, мелкозернистую равномерную структуру, высокую технологическую деформируемость. Большую часть слитков из цветных металлов и сплавов на металлургических заводах РФ получают методами направленной кристаллизации.

Дефекты металлургического происхождения являются «наследственными», большая часть из них сохраняется при прокатке (изменяется только их форма – они вытягиваются в направлении прокатки), снижая качество
штампованных из такого проката деталей. Разнородность слитков, поступающих на прокатку (по содержанию основных компонентов и примесей, по степени газонасыщенности и другим показателям) является основной причиной неоднородности структуры в объеме данного прутка и нестабильности его свойств. Также влияют колебания температур нагрева металла перед прокаткой, неравномерность прогрева заготовки по объёму, колебания температур окончания прокатки и неравномерность охлаждения в процессе прокатки и после её окончания.

Динамическая рекристаллизация при сортовой прокатке и вторичная рекристаллизация при последующем охлаждении не обеспечивают полного разупрочнения материала. Как следствие, сортовой прокат без дополнительной термической обработки имеет неоднородную структуру, и свойства его нестабильны. Кроме того, в сталях с повышенным содержанием углерода и некоторых низколегированных сталях при естественном охлаждении происходит упрочняющая термическая обработка.

Перед закрытой прошивкой полостей в деталях рекомендуется предварительная термическая обработка заготовок, которая может осуществляться на металлургических заводах. Предварительная термообработка может занимать различное место в технологическом процессе: 1) до калибровки прутков волочением (т.е. отжигу подвергается горячекатаный металл); 2) на одном из этапов калибровки; 3) после калибровки. Холодная пластическая деформация исходной горячекатаной стали волочением прутков разрушает строчечную структуру и создает условия для быстрого и полного прохождения рекристаллизационных процессов.

Лучшие результаты достигаются при термической обработке после окончания подготовительных операций ХОШ, в частности, калибровки, показанной на рис. 1.15.

Температуру нагрева при прокатке, время выдержки при термообработке принимают наименьшими, при условии стабильного получения заданных структур и свойств. С увеличением этих параметров проявляются окисление, обезуглероживание, насыщение водородом поверхности обрабатываемого металла, вредно отражающиеся на процессе его последующей пластической деформации.

Электронагревательные устройства (индукционные, контактные) применяют ограничено. Эти устройства обеспечивают большую скорость нагрева, однако структура и свойства при прокатке нагретого таким образом материала получаются неравномерными, а сопротивление деформированию – повышенным.

Обезуглероженная поверхность металла, образующаяся при нагреве под прокатку, восприимчива к образованию рисок, задиров, царапин при прокатке, а также при калибровании проката. Поэтому нагрев металла для прокатки и отжиг проката необходимо производить в печах с защитной атмосферой.

Чтобы уменьшить вероятность проявления дефектов в сортовом прокате, предназначенном для ХОШ, слитки обрабатывают резанием. При этом уделяется особое внимание толщине снимаемого слоя: при недостаточной толщине при дальнейшей обработке вскрываются подкорковые дефекты, а при излишнем повышении толщины создаются нерациональные технологические отходы. В большинстве случаев при обработке резанием слитков удаляют лишь крупные дефекты (шлаковые засоры и т.п.). При дальнейшей обработке слитков (нагреве, горячей прокатке, промежуточной термической обработке) проявляются более мелкие дефекты (плены, раковины, пузыри и т.п.). Образуются и дополнительные дефекты: избирательное окисление, закатка окалины, следы от налипшего на валки металла и обдирочного шлифования валков и т.п. По мере вытяжки заготовки при прокатке дефекты литья и прокатки уменьшаются в абсолютных размерах и приближаются к поверхности заготовки. Эффективность по качеству снятия дефектного поверхностного слоя обработкой прутка резанием увеличивается. На некотором этапе при дальнейшей вытяжке, особенно холодном волочении, дефекты выходят на поверхность прутка и постепенно исчезают.

Сказанное позволяет заключить, что при использовании холоднотянутых прутков и проволоки диаметром до 10 ... 12 мм и высокой культуре металлургического производства достигается хорошее качество поверхности изготавливаемых деталей. С увеличением размеров поперечного сечения проката в нем увеличивается содержание металлургических дефектов, ведущих к снижению качества изготовленных ХОШ деталей. Прокат больших диаметров, направляемый на ХОШ, должен подвергаться обдирке точением или обдирочному шлифованию (для заготовок из легированных никелем сталей) на глубину не менее 1,2 ... 1,5 мм с последующим полированием и матированием. Матирование железными щётками позволяет удалить плены и другие дефекты и одновременно повысить способность поверхности металла к адсорбции смазочного материала. Изделия, изготовленные из проволоки, подвергшейся обтачиванию или шлифованию, при штамповке имеют высокое качество и весьма низкий процент брака по наличию трещин.

Горячекатаная, а также отожженная сталь обычно покрыта тонким слоем окалины, которая изменяет точность размеров проволоки при волочении, способствует возникновению дефектов в виде рисок и царапин, а также износу волок. При травлении кислотами происходит отделение окалины, так как в процессе травления кислота разрушает окалину, вступая в соединение с металлом. При этом выделяется водород, одна часть которого через травильную жидкость уходит в ванны, а другая часть диффундирует в металл, образуя с ним химические соединения.

При травлении проката в мотках в результате плотного прилегания витков часть окалины остаётся на поверхности металла. Оставшаяся окалина попадает в смазку. Наличие окалины в смазке способствует образованию рисок и царапин на калиброванной стали, которые раскрываются в результате в трещины при ХОШ изделий. Также окалина способствует образованию рисок и царапин на волоках, что приводит к увеличению коэффициента трения при калибровании и уменьшению срока службы волок, снижает качество поверхности изделий. В связи с этим очистку от окалины и других загрязнений следует производить механическими методами, либо сочетать травление с матированием (для стали и твёрдых сплавов цветных металлов) или крацеванием (для мягких цветных металлов и сплавов), использовать эффект воздействия ультразвуковых колебаний.

При ХОШ стали, наряду с рассмотренным в п. 1.1 упрочнением, происходят вторичные, вызванные деформационным упрочнением (наклепом) физико-химические явления на границах зерен и внутри них: диффузия атомов азота и углерода, взаимодействие дислокаций с растворенными примесями, рост микроискажений, накопление несовершенств и т.п. Этот комплекс явлений, получивший название деформационного старения, вызывает дополнительное снижение показателей технологической деформируемости сталей. Повышение фактической температуры деформации за счет теплового эффекта до 250...300 °С и более, ускоряет протекание и усиливает эффект деформационного старения стали.

Деформационное старение, происходящее после холодной пластической деформации, вызывает снижение показателей пластичности (относительного сужения и, особенно, относительного удлинения при испытании стандартных образцов на разрыв), повышение показателей сопротивления деформированию (твердости, предела текучести, временного сопротивления и др.). Особенно сильно снижается ударная вязкость. Склонность стали к старению зависит от химического состава, способа и условий плавки и раскисления, режимов предшествующей термообработки и обработки давлением. Деформационное старение может быть естественным (при вылеживании исходных заготовок, поковок по переходам и готовой продукции) и искусственным (при нагревании поковок, за счет теплового эффекта).

В наибольшей степени деформационное старение проявляется у низкоуглеродистых сталей. Средне- и высокоуглеродистые стали также, хотя и в меньшей степени, подвержены деформационному старению.

Основным элементом, определяющим склонность углеродистой стали к деформационному старению, является азот. Примеси марганца, алюминия и др., связывающие часть азота, ослабляют эффект старения. Примеси ванадия, молибдена, хрома, титана и ниобия уменьшают, а при повышенном их содержании полностью исключают деформационное старение; примеси меди и никеля усиливают старение.

У кипящих сталей эффект старения проявляется наиболее сильно. Стали вакуумной плавки не подвержены деформационному старению. У сталей, не подверженных деформационному старению, на кривой зависимости силы P растяжения стандартного образца от приращения его длины  $\Delta l$  площадка текучести отсутствует. Наиболее сильное изменение свойств заготовки

вследствие деформационного старения происходит после пластической деформации сжатием. Увеличение размеров зерен повышает эффект старения.

При малых величинах деформации (*e* = 5 ... 10%), характерных для операций калибровки заготовок, эффект старения выше, чем при больших величинах. Рекомендуется, в случае наличия разрыва во времени, между калибровкой и последующим формоизменением заготовки отжиг производить после калибровки, особенно если калибровка осуществлялась методом осаживания заготовки.

# 1.4. Особенности холодной объемной штамповки деталей из порошков на железной основе с позиций технолога

Шихта, состоящая из смесей порошков различных компонентов, превращается в порошковую сталь в процессе спекания уплотненных заготовок. Однако из-за наличия частиц разной величины, формы, плотности и структуры их поверхности эффект легирования от введения некоторых элементов неполный из-за недостаточной степени гомогенизации материала [19].

Порошковые материалы на железной основе (порошковые стали) могут быть углеродистыми (в зависимости от содержания углерода – низко-, средне- и высокоуглеродистыми) или легированными (низколегированными, легированными или сложнолегированными). Благодаря углероду формованный полуфабрикат приобретает способность закаливаться.

При традиционном холодном уплотнении порошка, осуществляемом при формовании его перед спеканием в заготовку или сразу в машиностроительную деталь, применяют одностороннее или двухстороннее сжатие в закрытой матрице. Прикладывают удельную силу (давление) 600 ... 800 МПа. Если удельная сила *р* меньше 600 МПа или больше 800 МПа, то после снятия нагрузки цельной заготовки не получается. При указанных давлениях заготовка имеет остаточную пористость 15 ... 18%.

При уплотнении сжатием в закрытой матрице частицы порошка незначительно перемещаются друг относительно друга в радиальном направлении. Происходит лишь осадка порции порошка с заполнением пустот, образовавшихся при засыпке порошка в матрицу. В местах взаимного контакта частиц порошка возникают в основном нормальные напряжения, а доля касательных напряжений незначительна. Поэтому оксидные пленки на поверхности частиц не разрушаются, а изменяют свою форму вместе с материалом частиц. В результате частицы порошка даже при высокой его плотности разделены хрупкой оксидной пленкой в виде пространственной сетки.

Давлений меньше 600 МПа недостаточно для обеспечения минимально компактного образца, который можно передать на спекание.

При давлениях свыше 800 МПа причина разрушения заготовки состоит в том, что образующиеся при уплотнении порошка осевым сжатием в закрытой матрице макропоры, как все арочные конструкции, очень устойчивы к действию сжимающих напряжений p (рис. 1.16). Раньше, чем эти поры закроются, под действием p на поверхности пор зарождаются трещины, и при дальнейшем деформировании заготовка разрушается.



**Рис. 1.16.** Зарождение показанных пунктирной линией трещин на поверхности поры при сжатии порошка в закрытой матрице

Таким образом, увеличивая давление при применении традиционных схем уплотнения порошков на железной основе, не удается уменьшить остаточную пористость изготавливаемых деталей. При пористости формованного полуфабриката, превышающей 10%, легирование его углеродом, никелем, медью, хромом и фосфором не позволяет получить порошковые детали высокой прочности и пластичности.

Термическая обработка порошковых конструкционных материалов имеет ряд существенных особенностей, обусловленных наличием пористости [20]. Твердость закаленных с оптимальных температур образцов порошковых сталей всегда ниже твердости литых сталей аналогичного состава. Так, твердость закаленных образцов эвтектоидной стали СП80-2 с пористостью 13% составляет 48 ... 52 *HRC*, а образцов литой стали – 61 ... 63 *HRC*. Ввиду этого при изготовлении порошковых деталей с заданным уровнем механических свойств в первую очередь необходимо обеспечивать высокие значения их плотности [1, 3, 5, 20].

Формованную заготовку спекают с созданием в печи восстановительной газовой среды, в качестве которой используют водород или диссоциированный аммиак. При спекании происходят сложные процессы. Частички металла в местах контакта между собой могут расплавляться, проникать друг в друга. Образуется плотная масса, свойства которой зависят от того, как происходили уплотнение и нагрев. Процесс диффузии идет во времени, с увеличением температуры и давления время процесса уменьшается. Этот идеальный процесс имеет место, когда поверхность частиц свободна от оксидных пленок. После спекания заготовка представляет собой твердое тело, имеющее остаточную пористость.

С целью удешевления спекания иногда используют газовую среду, не восстанавливающую уже имеющиеся оксидные пленки, а только не допускающую дальнейшего окисления. Например, спекание в аргоне, эндогазе или азоте.

Спекание производят при высокой температуре, которая, однако, не достигает температуры плавления основного компонента смеси. Спекание чистых порошковых металлов производится в большинстве случаев при температуре около 0,67 ... 0,8 их абсолютной температуры плавления (Т*пл*), сплавов – в ряде случаев при температурах, несколько превышающих температуры плавления самого легкоплавкого (связующего) металла или его эвтектики с основным тугоплавким металлом. Для спекания используют как камерные, так и проходные печи. Для спекания при температурах до 1050 ... 1100 °C применяют электрические печи сопротивления, до 1200 °C – газовые печи, до 1300 °C – электрические печи с силитовыми нагревательными элементами сопротивления.

Спекание сопровождается, как правило, увеличением поверхности контакта между частицами и соответствующим ростом прочности, а также изменениями плотности (обычно ее увеличением, реже уменьшением), зависящими от состава легирующих железный порошок компонентов.

Проведенное авторами данной монографии исследование по спеканию заготовок из железного порошка ПЖВ4.160.28 в среде водорода при температуре 1200 °C при варьировании времени спекания от 1 до 3 ч показало, что остаточная пористость  $\delta$  (%) в зависимости от времени t (ч) изменяется по закону  $\delta = 20 - 1.4 t$ .

Процессы рекристаллизации при спекании заготовок из железных порошков протекают при более высоких температурах (обычно 0,6 ... 0,8 T<sub>пл</sub>), чем при термической обработке деформированных прокаткой литых железных заготовок (обычно 0,4 T<sub>пл</sub>).

Температура спекания зависит от требований, предъявляемых к спеченному материалу, и от характеристики исходных порошков. Чем они мельче, тем больше внешняя и внутренняя (в связи с пористостью) поверхность их частиц, тем ниже требуемая температура спекания. Повышение температуры существенно увеличивает скорость спекания и, как правило, оказывается выгоднее увеличения его продолжительности.

В целях получения более однородных по составу и структуре изделий из смесей порошковых компонентов рекомендуется перед формованием подвергать смесь отжигу при 800 ... 850 °C. Такая термообработка обеспечивает изготовление изделий с повышенными механическими характеристиками.

При производстве деталей из железного порошка можно применить XOШ, используя спеченную заготовку простой формы, как обычную компактную заготовку, отрезанную от прутка. При изготовлении такой заготовки из легированной порошковой стали при XOШ возникают настолько большие удельные силы, действующие между инструментом и заготовкой, что инструмент или не обеспечивает достаточного сопротивления усталости при формоизменении заготовки, или сразу разрушается.

При изготовлении высокоплотной порошковой детали непосредственно из порошковой шихты (минуя промежуточную спеченную заготовку) для предотвращения образования микротрещин вокруг остаточных пор в заготовке авторами данной монографии разработаны способы деформирования в условиях, при которых в заготовке происходят интенсивные сдвиги между частицами (рис. 1.17).



Рис. 1.17. Закрытие микропор в уплотняемом давлением *p* порошке при приложении сдвигающего слои давления т

Если кроме давления *p* приложить сдвигающее напряжение т, пора легко закроется, и отмеченных выше трещин не будет.

Такой метод уплотнения порошковой шихты с созданием сдвигов между частицами дает возможность значительного легирования порошковых сталей, изготовления деталей практически из любых композиций.

В отличие от технологии формования из порошков заготовок простейших форм, их спекания и ХОШ из спеченных заготовок деталей заданных форм, при методе уплотнения со сдвигами удельная сила на инструменте не превышает 1000 МПа ( $q \le 1000$  МПа). При необходимости она может быть увеличена, поскольку сдвиги внутри уплотняемой порошковой заготовки разрушают образующиеся поры, и показанные на рис. 1.16 трещины не зарождаются. На заключительной стадии деталь спекают.

При использовании порошков-сплавов (легированных порошков), полученных распылением слитков легированных сталей, можно сократить время

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

высокотемпературного спекания, которое необходимо для гомогенизации материала в случае применения шихт из смеси порошков разных металлов.

При одинаковом давлении холодного уплотнения остаточная пористость заготовок из порошков-сплавов на 10 ... 20% выше, чем заготовок из смесей компонентов [19]. При этом стоимость порошков-сплавов существенно превосходит стоимость смесей компонентов.

Поскольку авторы данной монографии разрабатывают способы снижения остаточной пористости порошковых деталей, позволяющие повышать механические характеристики деталей при применении менее дорогостоящих материалов, применение порошков-сплавов в данной монографии не рассматривается.

# 2. РАЗРАБОТКА ОПЕРАЦИЙ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПРОКАТАННЫХ ПРУТКОВ

# 2.1. Механические характеристики изготавливаемых деталей

При ХОШ заготовок существенно меняется комплекс механических характеристик материала. Изменение механических характеристик сталей при ХОШ происходит из-за упрочнения материала. Упрочнение является следствием холодной пластической деформации зерен, сопровождающейся увеличением количества несовершенств их кристаллической структуры и затруднением внутризеренного смещения атомов по плоскостям скольжения.

В результате описанного ниже исследования количественно оценено изменение механических характеристик при ХОШ закрытой прошивкой для группы конструкционных сталей в зависимости от режима отжига заготовки перед прошивкой и от степени деформации заготовки, и это изменение описано в виде простых алгебраических зависимостей. Полученные зависимости позволяют прогнозировать, как изменятся механические характеристики заготовки, если деталь изготавливать ХОШ.

Исследованы механические характеристики изготовленных деталей типа стаканов с полостями диаметром 40мм и наружными диаметрами 53,3 мм и 60 мм. Из стали Ст3 такие изделия штамповали как без предварительного отжига заготовок, так и с отжигом по режиму: нагрев до 870 ... 890 °C, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе, последующий нагрев до 680 ... 700 °C, выдержка 4 ч, охлаждение с печью. Из стали 20 изделия штамповали без предварительного отжига заготовок. Для сталей 35 и 45 проводили маятниковый отжиг: нагрев до 760 ... 780 °C, выдержка 1 ч, охлаждение с печью до 650 ... 670 °C, выдержка 1 ч, – всего 4 цикла, охлаждение с печью.

Стаканы с наружным диаметром 53,3 мм (рис. 2.1) штамповали из заготовок диаметром 53,3 мм в матрице с диаметром полости 53,3 мм.



Рис. 2.1. Фотографии заготовки и штампованного из нее стакана

Стаканы с наружным диаметром 60 мм штамповали из заготовок с диаметром 60 мм в матрице с диаметром полости 60 мм. Диаметр пуансона, формирующего полость стакана, в обоих случаях равнялся 40 мм. При этом рассчитанная по формуле (1) степень деформации заготовки диаметром 60 мм составляла 44,5 %, а степень деформации заготовки с диаметром 53,3 мм составляла 56,3%.

Перед ХОШ заготовки подвергали травлению с целью снятия окалины, образовавшейся вследствие термообработки, фосфатированию и омыливанию. Для травления применяли раствор серной кислоты. После травления проводили промывку заготовок в холодной и горячей воде. Для фосфатирования применяли раствор, состоящий из монофосфата цинка в концентрации 70 г/л и нитрата натрия – 35 г/л. Температура раствора 70 ... 80 °С, время фосфатирования 10...15 мин. Фосфатированные заготовки после промывки омыливали. Концентрация мыльного раствора 50 ... 70 г/л 72%-ного хозяйственного мыла, температура около 80 °С, время омыливания 10 ... 15 мин.

Детали из стали 20 штамповали за два перехода с промежуточным фосфатированием и омыливанием. Штамповать их за один переход было невозможно из-за разрыва смазочного слоя на поверхности формирующейся полости и вследствие этого схватывания между собой материалов пуансона и заготовки. Поскольку перед вторым переходом при фосфатировании полуфабрикатов деталей после первого перехода проходило время (несколько суток), происходило деформационное старение материала, о котором говорилось выше, в п. 1.3. В результате старения при выполнении закрытой прошивки таких полуфабрикатов удельная сила на пуансоне кратковременно возрастала примерно на 5% по сравнению со своим средним значением во время первой операции прошивки. Возрастания деформирующей силы в течение проведения формоизменения заготовки практически не наблюдалось. Это можно объяснить протекающим одновременно с упрочнением разогревом деформируемого материала и снижением его сопротивления деформации.

В связи с деформационным старением полуфабрикатов деталей целесообразно прокомментировать вариант технологии, при котором осуществляется промежуточный отжиг полуфабрикатов между переходами штамповки. Промежуточный отжиг устраняет эффект упрочнения материала на первом переходе штамповки и снижает необходимую для выполнения второго перехода деформирующую силу. Однако при такой технологии стенка изготовленного стакана будет иметь неравномерные по высоте показатели механических характеристик, рассмотренных в данном пункте монографии ниже. Выравнивание этих показателей путем проведения заключительной термообработки изготовленной детали вообще исключает эффект упрочнения материала, достигаемый при ХОШ. Если ХОШ проводится только с целью уменьшения припусков на штампованной поковке, по сравнению с горячей объемной штамповкой, и не предусматривает упрочнения заготовки, такой вариант технологии возможен. Однако промежуточный отжиг существенно повысит стоимость изготовленной детали и уменьшит целесообразность проведения ХОШ.

Штамповку деталей из сталей 35 и 45 осуществляли за один переход. Это объясняется меньшим схватыванием среднеуглеродистых сталей 35 и 45 с инструментальными сталями, из которых были изготовлены пуансоны.

Обсуждая удержание смазки на поверхности прошиваемой полости заготовки, отметим влияние формы рабочей части примененных авторами пуансонов. Торец пуансонов имел плоскую часть диаметром 30 мм (при диаметре калибрующего пояска 40 мм) и выше нее – конус с углом при вершине 90°. Рабочие чертежи пуансонов приведены ниже, на рис. 5.5 и 5.10. При пробной штамповке закрытой прошивкой деталей, показанных на рис. 2.1, пуансонами с диаметром плоской части торца 20 мм и углом при вершине конуса 1500 необходимая для ХОШ сила увеличивалась на 10%.

Заметим здесь, что ниже, в комментарии рис. 5.5, описана важность правильного назначения диаметра стержневой части пуансона по отношению к диаметру калибрующего пояска пуансона. С позиций повышения сопротивления пуансон усталости некоторые авторы рекомендуют стержневую часть пуансона конструировать с диаметром, всего лишь на 0,2 ... 0,3 мм меньшим, чем диаметр калибрующего пояска. Однако при закрытой прошивке деталей, показанных на рис. 2.1, стержневая часть пуансонов, закаленных на 61 ... 63 *HRC*, при действии удельной силы q = 2500 МПа пластически осаживалась с увеличением ее диаметра на 0,5 мм. При этом уже не находящаяся в пластическом состоянии трубная часть полуфабриката, расположенная выше калибрующего пояска пуансона, охватывала с натягом осаженную стержневую часть пуансона, что существенно повышало удельную силу ХОШ детали.

Указанная выше форма торца пуансона в виде усеченного конуса имеет существенное значение не только для снижения силы штамповки, но и для удержания на торце пуансона смазочного материала и исключения схватывания между собой материалов пуансона и заготовки.

Рассмотрение различных форм торца рабочей части пуансона показало, что наилучшее удержание смазочного материала имеет место при плоском торце на всем диаметре калибрующего пояска пуансона. Однако при таком торце сила закрытой прошивки наибольшая. Наименьшая сила имеет место при торце в виде полусферы с радиусом, равным радиусу калибрующего пояска пуансона. Однако такой торец пуансона является худшим с позиции удержания на его поверхности смазочного материала. Пуансон с торцом в виде конуса с острой вершиной торца имеет недостатки по сравнению с пуансонами с другими формами как по силе штамповки, так и по удержанию смазочного материала.

При проектировании технологического процесса закрытой прошивки детали с полостью, торец которой имеет конкретно заданную форму, следует на этапе прошивки полости применять пуансон с усеченным конусом на его торце, чтобы сила штамповки была сравнительно небольшой, и удержание смазочного материала было удовлетворительным. Требуемую окончательную форму торца полости детали при этом можно обеспечить введением дополнительной операции калибровки торца полости пуансоном соответствующей формы.

При зарытой прошивке полости пуансоном с торцом рабочей части в виде усеченного конуса следует учитывать, что при изменении относительной (по отношению к диаметру калибрующего пояска пуансона) толщины стенки штампуемой детали отмеченное выше, как лучшее, соотношение величин диаметра плоской части торца и угла при вершине конуса меняется. При уменьшении относительной толщины стенки диаметр плоской части торца пуансона целесообразно уменьшать, а угол при вершине конуса на переходе к калибрующему пояску пуансона увеличивать. Поэтому при относительно более тонкой стенке детали рассмотренный выше пуансон с диаметром плоской части торца 20 мм и углом при вершине конуса 150° предпочтительнее того, применение которого было рекомендовано выше для детали с относительно более толстой стенкой (см. рис. 2.1).

Для ХОШ заготовок из сталей 35 и 45 в неподвижно закрепленной матрице требуется создание на пуансоне удельной силы, превышающей 2500 МПа. Выше было показано, что при такой удельной силе процесс ХОШ перестает быть экономически оправданным. Поэтому ХОШ проводили в штампе, схема которого приведена на рис. 1.5 и в котором была применена подвижная (так называемая, плавающая) матрица. Однако, при штамповке заготовок из указанных сталей, опорная конструкция, через которую нижний торец выдавливаемого стакана опирался на нижнюю плиту 10, и сама эта плита были значительно усилены.

Фотография штампа, схема которого была приведена на рис. 1.5, приведена на рис. 2.2.

В этом штампе в начале деформирования заготовка осаживается, заполняя зазор, с которым она была установлена в матрице. При этом благодаря трению на контакте с заготовкой матрица 9 опускается, сжимая пружины 11. После начала внедрения пуансона в заготовку и формирования стенки стакана матрица 9 под действием контактного трения перемещается вверх. Этому способствуют также пружины 11, накопившие энергию при осадке заготовки на предыдущей стадии. Благодаря перемещению матрицы вверх на части высоты очага пластической деформации заготовки создаются активно направленные напряжения контактного трения, способствующие вытеканию металла в стенку стакана.



Рис. 2.2. Штамп для XOШ, установленный на гидропрессе

Примененный способ штамповки позволил уменьшить удельную силу на пуансоне приблизительно на 10%, что существенно повысило сопротивление пуансона усталости, оцениваемое по кривой на рис. 1.2.

При ХОШ стаканов из сталей указанных выше марок были исследованы механические характеристики материалов в трех состояниях: в состоянии поставки (исходное), в отожженном состоянии (для каждой стали отжиг проводился, как указано выше) и после ХОШ закрытой прошивкой.

Результаты исследований образцов представлены в табл. 2.

Величины пределов текучести и прочности, относительного удлинения и относительного

сужения шейки стандартного образца с головками измеряли при испытании образцов на разрыв. Твердость и ударную вязкость измеряли на образцах Менаже при испытаниях на копре. Всего было проведено 12 серий замеров механических характеристик, с вырезкой образцов из выдавленных стаканов. Также производили замеры механических характеристик у образцов,

вырезанных из заготовок, подготовленных для штамповки закрытой прошивкой.

Результаты расчетов коэффициентов парной корреляции между механическими характеристиками для заготовок и штампованных из них деталей сведены в табл. 3. Значения коэффициентов парной корреляции, которые после сравнения со значением, взятым из справочной таблицы [21], оказались по абсолютной величине больше табличного значения, были признаны статистически значимыми. Они в табл. 3 отмечены звездочками.

		Степень		Механич	неские	характ	еристики	
Марка стали	Состояние	деформ., %	σ <sub>т</sub> МПа	Механические характеристи $\sigma_{\Gamma}$ $\sigma_{B}$ $\delta$ $\psi$ KC,4567819441633,758,890323640635,864,1-5186386,7346,25325686975,6137,45967237334,6534,65197017243,5325,44422504202555-3168537,550,28603209173,421,2430335657,425,244,883024651831,460,49535025365,3636,84715325664,226,642117,755226,555-24751528,660,9-7488256,2633,3463	КС, кДж/м <sup>2</sup>	HB		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	исходн	юе	194	416	33,7	58,8	903	112,7
	отожж	ен.	236	406	35,8	64,1	-	-
C-2	штамповка	44,5	618	638	6,73	46,2	532	181
CT3	ИЗ ОТОЖЖ.	56,3	668	697	5,61	37,4	596	200
	штамповка	44,5	723	733	4,65	34,6	519	218
	из исходн.	56,3	701	724	3,53	25,4	442	229
	исходн	юе	250	420	25	55	-	-
20	штамповка	44,5	816	853	7,5	50,2	860	236
	из исходн.	56,3	820	917	3,4	21,2	430	243
	исходн	ioe	335	657,4	25,2	44,8	830	178
25	отожж	ен.	246	518	31,4	60,4	953	135
33	штамповка	44,5	502	536	5,36	36,8	471	225
	из отожж.	56,3	532	566	4,2	26,6	421	254
	исходн	юе	317,7	552	26,5	55	-	-
	отожж	ен.	247	515	28,6	60,9	-	-
15	штамповка	44,5	748	825	6,26	33,3	463	229
43	ИЗ ОТОЖЖ.	56,3	780	865	5,56	31	463	233,5
	штамповка	44,5	872	921	4,2	21,7	410	251
	из исходн.	56,3	926	983	3,7	16,4	330	263

Табл. 2. Полученные в эксперименте механические характеристики образцов

Между механическими характеристиками со значимой корреляционной связью были получены следующие уравнения:

$$\sigma_{\rm T} = 4,1 \ HB - 152; \ \sigma_{\rm B} = 5,1 \ HB - 352,6; \ \psi = 130,6 - 0,44 \ HB; \\ \delta = 0,125 \ \psi + 1,24; \ \ {\rm KC} = 8,7 \ \psi + 226.$$
(2)

Эти уравнения позволяют предсказывать механические характеристики изготовленной детали по результатам измерения у нее только твердости НВ. Однако напомним, что эти уравнения применимы для деталей, изготовленных из примененных в эксперименте сталей, при степенях деформации 44,5 ... 56,3%.

Получением зависимостей (2) создана возможность неразрушающего и экономичного по трудозатратам контроля производственного процесса ХОШ деталей типа стаканов закрытой прошивкой. Контроль сводится к периодическим замерам твердости изготовленных деталей.

По результатам проведенного исследования конструкторы, разрабатывающие детали различных машин, и технологии, изготавливающие эти детали, при согласовании марки стали имеют возможность оценить достигаемый комплекс механических характеристик детали.

	σ <sub>T</sub>	σ <sub>B</sub>	δ	ψ	KC	HB
σ	1	0,981*	- 0,51	- 0,693*	- 0,696*	0,938*
σ	0,981*	1	- 0,504	- 0,595	- 0,476	0,938*
δ	- 0,51	- 0,504	1	0,922*	0,678*	- 0,55
ψ	- 0,693*	- 0,595*	0,922*	1	0,818*	- 0,719*
КС	- 0,696*	- 0,476	0,678*	0,818*	1	- 0,443
HB	0,938*	0,938*	- 0,55	- 0,719*	- 0,443	1

Табл. 3. Коэффициенты парной корреляции между механическими характеристиками деталей

Ниже описано исследование, показывающее, как управление параметрами процесса ХОШ позволяет обеспечить заданный комплекс механических характеристик изделия.

Исследована зависимость удельной силы ХОШ стаканов от твердости исходной заготовки из углеродистой стали (НВ) и рассчитываемой по формуле (1) степени ее деформации (СД). Матрица плана эксперимента приведена в табл. 4.

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Номер опыта	HB	СД,%	<i>q</i> , МПа
1	105	44,5	1900
2	135	44,5	2000
3	165	44,5	2400
4	105	56,3	2000
5	135	56,3	2200
6	165	56,3	2500

Табл. 4. Матрица плана эксперимента

Заданный комплекс характеристик должен сочетать в себе одновременно высокие значения прочности и пластичности детали. При этом удельная сила на пуансоне, прошивающем полость изделия в виде стакана, не должна превышать 2500 МПа.

В проводимом исследовании в результате многофакторного эксперимента строили математическую модель вида:

$$y_1 = b_0 + b_1 HB + b_2 CД + b_{11} HB^2 + b_{12} HB \cdot CД.$$
 (3)

Из табл. 4 и модели (3) видно, что твердость исходной заготовки варьировали на трех уровнях, а степень деформации – на двух уровнях. Также видно, какие значения принимали факторы при их варьировании.

В правом столбце табл. 4 приведены измеренные в каждом опыте значения удельной силы штамповки стакана, которая определяется делением силы закрытой прошивки на площадь сечения калибрующего пояска пуансона, равную площади поперечного сечения полости стакана.

После расчета коэффициентов, оценки их значимости и исключения члена с коэффициентом, значимость которого не подтвердилась, математическая модель (3) приняла следующий вид:

$$q [M\Pi a] = 0,11HB^2 - 24 HB + 11,4 C \square + 2782.$$
(4)

Рассчитанные по модели (4) значения удельной силы XOШ стаканов из различных сталей расходятся с результатами, измеренными в экспериментах, не более чем на 5%.

Осуществлен выбор наилучших значений параметров технологического процесса XOIII: марки углеродистой стали для исходной заготовки, наличия отжига заготовки, степени деформации заготовки при штамповке из нее стакана. Выбираемые значения параметров технологического процесса должны обеспечить получение детали с заданным комплексом механических характеристик:  $\sigma_{\rm T} \ge 700$  МПа;  $\sigma_{\rm B} \ge 750$  МПа;  $\delta \ge 5\%$ ;  $\psi \ge 40\%$ ; KC  $\ge 500$  кДж/м<sup>2</sup>;  $HB \ge 220$ . Как видно, комплекс механических характеристик соче-

тает в себе высокие характеристики прочности и высокие характеристики пластичности. Помимо этого, поставлено условие, что величина удельной силы штамповки  $q \le 2500$  МПа.

Для оценки соответствия механических характеристик и удельной силы штамповки деталей заданным требованиям была использована функция желательности [21]. Эта функция *d* записывается в виде:

$$d = \exp[-\exp(-y)], \tag{5}$$

где у – значение условного аргумента.

Исследователь на основании заданных требований и своего практического опыта ставит значения исследуемых параметров в соответствие со значениями аргумента *у*. При этом значению y = 0 соответствует минимально допустимое значение каждого исследуемого параметра.

В результате такой расстановки для исследуемых механических характеристик и удельной силы штамповки была составлена табл. 5.

У	σ <sub>т</sub> , МПа	σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %	ψ, %	КС, кДж/м <sup>2</sup>	HB	<i>q</i> , МПа
0	700	750	5	40	500	220	2500
1	800	850	6,5	50	600	235	2000
2	900	950	8	60	700	250	1500
3	1000	1050	9,5	70	800	265	1000
4	1100	1150	11	80	900	280	500

Табл. 5. Соответствие значений исследуемых параметров аргументу у

Наличие табл. 5 и формулы (5) позволяет для каждого полученного при проведении эксперимента значения исследуемого параметра (предела прочности, ударной вязкости, удельной силы штамповки и т.п.) посчитать желательность получения такого значения этого параметра ( $d\sigma_{\rm T}$ ,  $d_{\rm KC}$ ,  $d_{\rm g}$  и т.п.).

После подсчета желательностей для значений каждого из исследуемых параметров в данном опыте подсчитана обобщенная желательность *D* значений всех параметров опыта. Обобщенная желательность рассчитывается через произведение частных значений желательностей для каждого параметра в данном опыте. Это произведение возводится в степень 1/g, где g – количество исследуемых параметров, в данном случае их 7.

Для обобщенной желательности в исследовании построена математическая модель вида:

$$y_2 = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3, \tag{6}$$

где  $X_1$  – процентное содержание углерода в стали,  $X_2$  – наличие отжига заготовки:  $X_2 = -1$  соответствует ХОШ отожженной заготовки,  $X_2 = +1$  соответ-

ствует ХОШ неотожженной заготовки,  $X_3$  – степень деформации заготовки при закрытой прошивке.

Коэффициенты модели (6) определены по результатам эксперимента, матрица плана которого приведена в табл. 6. Из этой таблицы видно, какие значения принимали исследуемые 3 фактора при их варьировании.

Углерод в количестве 0,14% содержали заготовки из стали Ст3пс (ГОСТ380-2005), а углерод в количестве 0,44% – заготовки из стали 45 (ГОСТ 1050-88).

Справа от матрицы плана эксперимента в табл. 6 в каждом опыте приведены полученные значения частных желательностей для исследуемых параметров, а также – обобщенной желательности *D*, рассчитанной указанным выше способом. Помимо оцененных желательностей, в правом крайнем столбце табл. 6 зафиксированы удельные силы ХОШ стаканов в каждом из опытов.

Величина удельной силы входит в обобщенную желательность, как одна из характеристик энергоемкости технологического процесса. Помимо этого, в условиях ХОШ величина удельной силы на пуансоне ограничивает сопротивление пуансона усталости и таким образом является величиной, определяющей возможность применения технологии. Поэтому сочли целесообразным строить две модели вида (6): для обобщенной желательности, включая удельную силу закрытой прошивки, и отдельно для удельной силы закрытой прошивки.

Ma	Φ	актор	ы		Желательности							
ОП	X <sub>1</sub> , %	<i>X</i> <sub>2</sub>	X <sub>3</sub> , %	$d\sigma_{_{ m T}}$	$d\sigma_{_{ m B}}$	$d_{\delta}$	$d_{_{\psi}}$	d <sub>KC</sub>	$d_{_{HB}}$	$d_{_q}$	$\begin{array}{c} D\\ (y_2) \end{array}$	q, [МПа]
1	0,14	- 1	44,5	0,12	0,03	0,74	0,56	0,47	0,01	0,83	0,18	1800
2	0,44	- 1	56,3	0,64	0,75	0,48	0,10	0,26	0,60	0,45	0,40	2400
3	0,14	1	56,3	0,37	0,29	0,08	0,01	0,20	0,55	0,52	0,17	2300
4	0,44	1	44,5	0,74	0,72	0,90	0,70	0,57	0,64	0,37	0,64	2500

Табл. 6. Матрица плана и результаты эксперимента

После обработки результатов, приведенных в табл. 6, и вычисления коэффициентов моделей вида (6), получены следующие уравнения:

$$D = 0,552 + 1,153X_1 + 0,059X_2 - 0,011X_3;$$
(7)

$$q [M\Pi a] = 1009 + 1333X_1 + 150X_2 + 16,95X_3.$$
(8)

Анализ модели (7) показывает, что обобщенная желательность комплекса механических характеристик увеличивается при увеличении процентного содержания углерода в стали, штамповке неотожженной заготовки по сравнению со штамповкой отожженной и увеличении степени деформации заготовки. Удельная сила закрытой прошивки, как и следовало ожидать, увеличивается с увеличением содержания углерода в стали, штамповке неотожженной заготовки по сравнению со штамповкой отожженной и увеличением степени деформации заготовки.

Методом крутого восхождения по поверхности отклика [21] для обобщенной желательности D, используя уравнение (7), исследована возможность повышения комплекса механических характеристик деталей. Одновременно для каждого сочетания параметров технологического процесса, соответствующего шагам по поверхности отклика для D, по уравнению (8) рассчитаны значения удельных сил. Последовательность реализации этого этапа исследования показана в табл. 7.

Влияние фактора  $X_2$ , характеризующего наличие отжига заготовки, в табл. 7 при одинаковых уровнях варьирования факторов  $X_1$  и  $X_3$  рассмотрено на его верхнем и нижнем уровнях: с отжигом и без отжига.

Результаты исследования, проведенного методом крутого восхождения по поверхности отклика для D, показали следующее. Варьируя рассмотренные три фактора (параметра технологического процесса), можно повысить комплекс механических характеристик детали при удельной силе ХОШ, находящейся в пределах 2500 МПа, на 9% по сравнению с наилучшим комплексом, достигнутым при сочетании факторов в опыте 4 (табл. 6).

Таким повышенным комплексом может быть следующий:  $\sigma_{T} = 850 \text{ M}\Pi a$ ;  $\sigma_{R} = 900 \text{ M}\Pi a$ ;  $\delta = 7 \%$ ;  $\psi = 55 \%$ ;  $\text{KC} = \kappa \ \text{Д} \ \text{ж} \ / \ \text{M}^{2}$ ; HB = 250.

Для повышения комплекса механических характеристик целесообразно штамповать предварительно отожженные заготовки из стали с содержанием углерода 0,061% со степенью деформации 46% (в табл. 7 результаты этого опыта выделены жирным шрифтом и подчеркиванием).

Номер опыта	Содержание углерода	Наличие отжига	Степень деформации, %	D	q, МПа
1	0.37	с отжигом	40.3	0,393	2187
1	0,37	без отжига	49,5	0,511	2487
2	0.45	с отжигом	18.2	0,497	2277
2	0,43	без отжига	40,2	0,615	2577
2	0.53	с отжигом	47.1	0,601	2364
5	0,33	без отжига	47,1	0,719	2664
1	0.61	с отжигом	16	<u>0,704</u>	<u>2451</u>
4	0,61	без отжига	40	0,822	2751
5	0,69	с отжигом	44,9	0,815	2547

Табл. 7. Крутое восхождение по поверхности отклика для D при контроле q

Воспользовавшись формулой (1) определили, что изготовленный стакан при диаметре его полости 40 мм и степени деформации 46% должен иметь внешний диаметр 59 мм.

Если у изделия внешний диаметр меньше указанного, а во главу решаемой проблемы ставится достижение наилучшего комплекса механических характеристик, то или надо обтачивать штампованный стакан по наружной поверхности, или осуществлять его вытяжку с утонением стенки (см. раздел 6). Однако вытяжка с утонением стенки может несколько изменить полученный при закрытой прошивке комплекс механических характеристик стакана.

При существенных достоинствах ХОШ она имеет недостаток, заключающийся в анизотропии свойств изготавливаемых деталей. Анизотропия свойств вызвана неодинаковыми траекториями отдельных элементов исходной заготовки, по которым они перемещаются при изготовлении детали закрытой прошивкой. Расчету этих траекторий посвящены публикации авторов данной монографии в соавторстве с А.Л. Воронцовым, которые в данной монографии подробно не приводятся.

### 2.2. Силы штамповки закрытой прошивкой

Для более обобщенного, чем в результате описанных выше экспериментов, исследования зависимости удельной силы *q* от параметров ХОШ проведено представленное ниже теоретическое исследование.

Осуществляется ХОШ стаканов из сплошных цилиндрических заготовок. Схема операции штамповки приведена на рис. 2.3. При штамповке матрица перемещается со скоростью vм в направлении перемещения со скоростью vист материала заготовки.

Такая операция может быть осуществлена на одном из специализированных гидропрессов, созданных по чертежам, которые разработаны под руководством авторов данной монографии (см. раздел 5).



Рис. 2.3. Схема операции закрытой прошивки

Показанные на рис. 2.3 размеры детали отнесены к радиусу торца пуансона. Все скорости течения отнесены к скорости перемещения пуансона. Относительные размеры обозначены так же, как размеры, приведенные на рис. 2.3, но в их обозначениях отсутствует черта над буквой. Принята цилиндрическая система координат.

Деформируемая заготовка считается жесткопластической. Очаг пластической деформации представлен состоящим из областей I и П, отделенных друг от друга поверхностью  $\rho = 1$ . В силу осевой симметрии схемы,  $v_{\theta} = 0$ . С учетом граничных условий и характера распределения скоростей течения, экспериментально определенных на основании, в частности, фотографий на рис. 1.4, скорости течения частиц заготовки описаны функциями (в которые входит варьируемый параметр А):

$$\vartheta_{z1} = \frac{z}{h} \quad (Ah-Az-1), \ \vartheta_{z2} = -\frac{z}{h(R^2-1)} \quad (Ah-Az-1).$$
(9)

Из условия постоянства объема заготовки определены

$$\vartheta_{\rho 1} = -\frac{\rho}{2h} (Ah - 2Az - 1), \ \vartheta_{\rho 2} = -\frac{R^2 - \rho^2}{2\rho h (R^2 - 1)} (Ah - 2Az - 1).$$
(10)

Скорости деформаций рассчитаны по уравнениям Коши. Интенсивность скоростей деформаций:

$$\epsilon_{i1} = \frac{1}{h} \sqrt{\left(Ah - 2Az - 1\right)^2 + \frac{1}{3}A^2\rho^2},$$
  

$$\epsilon_{i2} = \frac{1}{3h(R^2 - 1)} \sqrt{\left(9 + \frac{R^4}{\rho^4} - \frac{R^4}{\rho^2}\ln^2\rho + R^4\ln^2\rho - 3\frac{R^2}{\rho^2} - 3R^2\ln\rho\right) \times \dots \rightarrow}$$
  

$$\sqrt{\rightarrow} \times (Ah - 2Az - 1)^2 + 3A^2(\frac{R^4}{\rho^2} - 2R^2 + \rho^2).$$

Согласно методу баланса мощностей отношение деформирующей силы к напряжению текучести материала заготовки с учетом того, что скорость перемещения пуансона принята равной 1, описано следующим выражением:

$$\frac{P_{\underline{n}}}{\sigma_{S}} = \sum_{h=1}^{H} \iiint_{V} \varepsilon_{i} dV + \sum_{m=1}^{M} \iint_{F} \frac{\tau_{k}}{\sigma_{S}} \sqrt{\vartheta_{k}^{2} + \vartheta_{l}^{2}} dF + \sum_{h=1}^{N} h \iint \frac{\tau_{S}}{\sigma_{S}} |\vartheta_{k} - \vartheta_{l}| dG , \quad (11)$$

где k, l – обобщенные координаты, последовательно принимающие значения  $\rho$ ,  $\theta$ , z;  $v_k$  и  $v_l$  – скорости течения в направлении обобщенных координат; H – число областей, на которые разбит очаг пластической деформации; M – количество поверхностей трения; N – количество поверхностей разрывов скоростей течения.

Для определения варьируемого параметра A, входящего в выражения для скоростей течения и деформаций, проведено решение уравнения

$$(\partial/\partial A)(P_{\pi} / \sigma_{s}) = 0.$$
(12)

После развертывания и суммирования слагаемых, входящих в уравнение (11), и решения его относительно А ,получено:

$$A = \frac{h(R^{2} - 1)^{2}[(\mu + 0,5)(R^{2} - 1) + 2R^{3} - 3R^{2} + 1 + Rh^{2}(\mu + 0,5)]}{R^{4}[h^{2}(R^{2} - 1)(R^{4} - 2R^{2} + 2) - \frac{R^{2}h^{2}}{9} + \frac{R^{4}h^{2}}{9} - \frac{R^{4}h^{2}}{9} \ln^{2}R + \frac{1}{4} + \frac{R^{6}h^{2}\ln R}{9} \times (\ln R - 1) + R^{4}h^{2}\frac{R^{2} - 1}{18} - \frac{2}{3}h^{2}R^{2}\ln R - \frac{1}{3}R^{4}h^{2}\ln R + \frac{1}{4} + \frac{R^{2}h^{2}R^{2} - 1}{6} + 2R^{4}\ln R - 2R^{2}(R^{2} - 1) + \frac{R^{6} - 2R^{4} + 3R^{2} - 2}{2}]$$
(13)

Входящие в выражение (13) величины (далее по тексту – факторы) R и h показаны на рис. 2.3,  $\mu$  – фактор трения.

При дальнейшем классическом решении задачи выражение (13) следует подставить вместо *A* в формулы (9) и (10) и уже с этими формулами, содержащими *A* в развернутом виде, произвести расчет по уравнениям Коши скоростей деформаций, а затем – интенсивности скоростей деформаций. Поскольку при применении уравнений Коши требуется дифференцирование формул для скоростей течения с параметром *A* в развернутом виде, реализовать это не представляется возможным.

С учетом характера кривых, построенных по зависимости (13), была принята следующая модель этой зависимости:

$$A_{\rm M} = b_0 + b_{11}R^2 + b_1R + b_{22}h^2 + b_2h + b_3\mu + b_{12}Rh + b_{13}R\mu.$$
(14)

Для определения коэффициентов модели (14) проведен расчет величины А по формуле (13).

Принятые в этом расчете уровни варьирования факторов и результаты расчета приведены в табл. 8. Для расчета коэффициентов модели (14) уровни варьирования факторов, приведенные в табл. 8, переведены в кодированный масштаб, в котором коэффициенты рассчитываются по следующей формуле:

$$b_{i} = \frac{\sum_{u=1}^{N} x_{iu} y_{u}}{\sum_{u=1}^{N} x_{iu}^{2}}, \quad i = 0, 1, 2...k,$$
(15)

где y – выходной параметр (в данном случае **A**), x – фактор в кодированном масштабе (в данном случае факторами являются R, h,  $\mu$ ), – номер фактора, u – номер строки в матрице плана эксперимента (см. табл. 9 и 10).

D	h	h 0,5		0,	75	1,0		
	μ	0	0,2	0	0,2	0	0,2	
1,	2	- 0,145	- 0,19	- 0,17	- 0,22	- 0,19	- 0,26	
1,	5	- 0,13	- 0,16	- 0,17	- 0,2	- 0,19	- 0,23	
2,	0	- 0,07	- 0,08	- 0,08	- 0,095	- 0,086	- 0,1	

Табл. 8. Уровни варьирования факторов и результаты расчета параметра А по формуле (13)

Формулы перехода от натуральных значений факторов к кодированным значениям и обратно следующие:

$$x_{1} = 10 (R - 1,57); \ z_{1} = x_{1}^{2} - x_{1} - 11,2;$$
  

$$x_{2} = 4 (h - 0,75); \ z_{2} = 3 (x_{2}^{2} - 0,67),$$
  

$$x_{3} = 10 (\mu - 0,1).$$
(16)

Использованные в расчете сочетания уровней факторов в кодированном масштабе приведены в табл. 9. Там же дано сравнение результатов расчета параметра A по формуле (13) – A и по математической модели (17) –  $A_{\rm M}$ .

После расчета коэффициентов модель (14) в кодированном масштабе имеет вид:

$$A_{\rm M} = -0,154 + 0,0019 \, z_1 + 0,0144 \, x_1 + 0,0011 \, z_2 - 0,023 \, x_2 - 0,017 \, x_3 + (17) + 0,0027 \, x_1 x_2 + 0,0026 \, x_1 x_3.$$

После перехода к натуральным значениям факторов модель (17) имеет вид:

$$A_{\rm M} = 0,19 R^2 - 0,579 R + 0,0528 h^2 - 0,341 h - 0,578 \mu + 0,108 R h + 0,26 R \mu + 0,377.$$
(18)

Табл. 9. Сочетания уровней факторов в кодированном масштабе и соответствующие им результаты расчета параметра А

№ сочет.	<i>x</i> <sub>0</sub>	<i>x</i> <sub>1</sub>	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>x</i> <sub>3</sub>	<i>x</i> <sub>1</sub> <i>x</i> <sub>2</sub>	$x_{1}x_{3}$	<i>z</i> <sub>1</sub>	<i>z</i> <sub>2</sub>	A	А <sub>м</sub>
1	1	- 3,7	- 1	- 1	3,7	3,7	6	1	- 0,145	-0,135
2	1	- 0,7	- 1	- 1	0,7	0,7	-10	1	- 0,13	- 0,138
3	1	4,4	- 1	- 1	- 4,4	- 4,4	4	1	- 0,07	- 0,065
4	1	- 3,7	0	- 1	0	3,7	6	- 2	- 0,17	- 0,171
5	1	- 0,7	0	- 1	0	0,7	-10	- 2	- 0,17	- 0,166
6	1	4,4	0	- 1	0	- 4,4	4	- 2	- 0,08	- 0,08
7	1	- 3,7	1	- 1	- 3,7	3,7	6	1	- 0,19	- 0,2

Окончание таблицы 9

№ сочет.	<i>x</i> <sub>0</sub>	<i>x</i> <sub>1</sub>	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>x</i> <sub>3</sub>	$x_{1}x_{2}$	$x_{1}x_{3}$	<i>z</i> <sub>1</sub>	<i>z</i> <sub>2</sub>	A	А <sub>м</sub>
8	1	- 0,7	1	- 1	- 0,7	0,7	-10	1	- 0,19	- 0,188
9	1	4,4	1	- 1	4,4	- 4,4	4	1	- 0,086	- 0,088
10	1	- 3,7	- 1	1	3,7	- 3,7	6	1	- 0,19	- 0,188
11	1	- 0,7	- 1	1	0,7	- 0,7	-10	1	- 0,16	- 0,176
12	1	4,4	- 1	1	- 4,4	4,4	4	1	- 0,08	- 0,076
13	1	- 3,7	0	1	0	- 3,7	6	- 2	- 0,22	- 0,225
14	1	- 0,7	0	1	0	- 0,7	-10	- 2	- 0,2	- 0,204
15	1	4,4	0	1	0	4,4	4	- 2	- 0,095	- 0,091
16	1	- 3,7	1	1	- 3,7	- 3,7	6	1	- 0,26	- 0,254
17	1	- 0,7	1	1	- 0,7	- 0,7	-10	1	- 0,23	- 0,226
18	1	4,4	1	1	4,4	4,4	4	1	- 0,1	- 0,099

В дальнейшем решении величина *А* оставлена временно как параметр. После суммирования выражений, входящих почленно в уравнение (11), и деления обеих частей этого уравнения на площадь пуансона, получено громоздкое выражение зависимости:

$$q/\sigma_{s} = f(R, h, \mu, A), \tag{19}$$

одно из слагаемых в которой – это член, учитывающий силу трения по наружной поверхности очага пластической деформации заготовки:

$$\frac{\mu Rh}{R^2 - 1} - \frac{A\mu Rh^2}{3(R^2 - 1)}$$

В выражении (19) это слагаемое присутствует со знаком «плюс», поскольку считается, что матрица неподвижна, и напряжения контактного трения направлены реактивно.

Высота очага пластической деформации *h* определяется из условия минимума энергии формоизменения (минимума мощности внешних сил) по следующему уравнению:

$$\partial q/\partial h = 0.$$

При этом требуется дифференцирование громоздкой зависимости (19), произвести которое не представляется возможным.

Для определения высоты очага пластической деформации h уравнение (19) заменено полиномом вида:

$$q_{_{\rm M}} / \sigma_s = b_0' + b_{11}' z_1 + b_1' x_1 + b_{22}' z_2 + b_2' x_2 + b_3' x_3 + b_{12}' x_1 x_2 + b_{13}' x_1 x_3.$$
(20)

Параметр A в модель (20) не входит, поскольку он однозначно связан с R, h и  $\mu$  формулой (13) и не может варьироваться независимо от них.

Для определения коэффициентов модели (20) проведен расчет величины  $q/\sigma_s$  по формуле (19). Приняты уровни варьирования факторов *R*, *h*,  $\mu$ , приведенные выше в табл. 8. Формулы перехода от натуральных значений факторов к кодированным значениям имеют вид (16).

В табл. 10 приведены принятые в расчете сочетания уровней факторов в кодированном масштабе и результаты расчета относительной удельной силы по формуле (19) –  $q / \sigma_s$  и по модели (20) –  $q_u / \sigma_s$ .

При расчете по формуле (19) параметр А рассчитывали по формуле (13).

После расчета коэффициентов по формуле (15) модель (20) в кодированном масштабе имеет вид:

$$q_{_{M}} / \sigma_{_{s}} = 3,78 + 0,0224z_{1} - 0,0615x_{1} + 0,0328z_{2} + 0,0467x_{2} + 0,177x_{3} - 0,0657x_{1}x_{2} - 0,0217x_{1}x_{3}.$$
(21)

После перехода к натуральным значениям факторов вид модели (21) следующий:

$$q_{_{\rm M}} / \sigma_{_{\rm S}} = 7,435 + 2,24 R^2 + 1,574 h^2 - 5,685 R + 1,95 h + + 5,18 \mu - 2,63 R h - 2,17 R \mu .$$
(22)

Зависимость высоты очага пластической деформации от размеров инструмента, определенная из условия минимума мощности внешних сил, следующая:

$$h = 0,835R - 0,619. \tag{23}$$

Путем подстановки (23) в (22) получено, при условии, что зависимость (22) записана для закрытой прошивки в неподвижной матрице:

$$q_{_{\rm M}} / \sigma_s = 6,831 + 1,141 R^2 - 4,056 R - 2,17 R \mu + 5,18 \mu$$
. (24)

Табл. 10. Сочетания уровней факторов в кодированном масштабе и результаты расчета относительной удельной силы

№ сочет.	<i>x</i> <sub>0</sub>	<i>x</i> <sub>1</sub>	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>x</i> <sub>3</sub>	$x_1 x_2$	$x_{1}x_{3}$	<i>z</i> <sub>1</sub>	<i>z</i> <sub>2</sub>	$q/\sigma_s$	$q_{_{\rm M}}/\sigma_{_{s}}$
1	1	- 3,7	- 1	- 1	3,7	3,7	6	1	3,62	3,628
2	1	- 0,7	- 1	- 1	0,7	0,7	-10	1	3,46	3,347
3	1	4,4	- 1	- 1	- 4,4	- 4,4	4	1	3,77	3,79
4	1	- 3,7	0	- 1	0	3,7	6	- 2	3,84	3,82
5	1	- 0,7	0	- 1	0	0,7	-10	- 2	3,38	3,34
6	1	4,4	0	- 1	0	- 4,4	4	- 2	3,4	3,452
7	1	- 3,7	1	- 1	- 3,7	3,7	6	1	5,14	4,21

№ сочет.	<i>x</i> <sub>0</sub>	<i>x</i> <sub>1</sub>	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>x</i> <sub>3</sub>	$x_{1}x_{2}$	$x_{1}x_{3}$	<i>Z</i> <sub>1</sub>	<i>Z</i> <sub>2</sub>	$q/\sigma_s$	$q_{_{\rm M}}/\sigma_{_{\rm S}}$
8	1	- 0,7	1	- 1	- 0,7	0,7	-10	1	3,49	3,53
9	1	4,4	1	- 1	4,4	- 4,4	4	1	3,33	3,317
10	1	- 3,7	- 1	1	3,7	- 3,7	6	1	4,06	4,14
11	1	- 0,7	- 1	1	0,7	- 0,7	-10	1	3,72	3,73
12	1	4,4	- 1	1	- 4,4	4,4	4	1	3,97	3,96
13	1	- 3,7	0	1	0	- 3,7	6	- 2	4,4	4,33
14	1	- 0,7	0	1	0	- 0,7	-10	- 2	3,67	3,72
15	1	4,4	0	1	0	4,4	4	- 2	3,6	3,61
16	1	- 3,7	1	1	- 3,7	- 3,7	6	1	4,85	4,72
17	1	- 0,7	1	1	- 0,7	- 0,7	-10	1	3,82	3,92
18	1	4,4	1	1	4,4	4,4	4	1	3,53	3,47

Окончание таблицы 10

Графики, построенные с использованием выражения (24), приведены на рис. 2.4 сплошными линиями. Их достоинством является отражение роста удельной силы закрытой прошивки при увеличении относительного радиуса матрицы свыше 1,5...2. Это имеет место на практике, что подтверждают эксперименты, но отражается далеко не всеми теоретически полученными зависимостями.



**Рис. 2.4.** Удельные силы закрытой прошивки: l;  $5 - \mu = 0,4$ ; 2;  $4 - \mu = 0,2$ ;  $3 - \mu = 0$ 

При закрытой прошивке с активно направленными напряжениями контактного трения, когда  $v_{_{M}} > v_{_{HCT}}$  (см. рис. 2.3), из удельной силы, рассчитанной по модели (24), вычитается удвоенное слагаемое, характеризующее направление напряжений контактного трения по наружной поверхности очага пластической деформации.

В результате получается

$$\left(\frac{q}{\sigma_{s}}\right)_{a} = 6,83 + 1,14R^{2} - 4,06R - 2,17R\mu + 5,18\mu - \frac{2\mu Rh}{R^{2} - 1} + \frac{2\mu Rh^{2}A}{3(R^{2} - 1)}.$$
 (25)

С учетом (18) и (23) выражение (25) принимает следующий вид:

$$\left(\frac{q}{\sigma_{s}}\right)_{a} = 6,83 + 1,14R^{2} - 4,06R - 2,17R\mu + 5,18\mu - \frac{2\mu R(0,835R - 0,619)}{R^{2} - 1} + \frac{2\mu R(0,835R - 0,619)^{2}(0,317R^{2} - 0,986R + 0,608 - 0,578\mu + 0,26R\mu)}{3(R^{2} - 1)}.$$

$$(26)$$

Рассчитанные с использованием выражения (26) удельные силы закрытой прошивки с активно направленными напряжениями контактного трения показаны на рис. 2.4 штриховыми линиями. Видно, что при  $\mu = 0,2$  удельная сила прошивки с активно направленными напряжениями контактного трения меньше удельной силы прошивки в неподвижной матрице на 7 ... 10,5%, а при  $\mu = 0,4$  эта разница составляет 16 ... 18,5%.

Выведенные теоретически зависимости (24), (26) являются неполным отражением реальной операции закрытой прошивки. Причина этого заключается в следующем.

Во-первых, заданные функции скоростей течения (9) и (10) отвечают граничным условиям, однако в принципе невозможно подобрать такие функции, которые точно описали бы реальное течение металла. В выражения (9) и (10) введен параметр *A*, величина которого при решении задачи определена из условия наименьших деформирующей силы и, соответственно, энергозатрат на деформирование заготовки. Однако практическая величина деформирующей силы всегда имеет несколько меньшую величину, чем при решении задач использованным выше методом. Принято считать, что примененный метод – это метод верхней оценки деформирующей силы.

Во-вторых, в теоретическом решении определена величина отношения удельной деформирующей силы к напряжению текучести материала заготовки:  $q/\sigma_s$ . Однако этот результат является не совсем эквивалентным для деформирования материалов, обладающих большей величиной  $\sigma_s$  или меньшей величиной  $\sigma_s$ , как следствие, разной величиной q. Причина в том, что величина q [МПа] неразрывно связана с давлением p на внутреннюю поверхность матрицы, в которой происходит штамповка заготовки. Оценочно можно считать, что в среднем  $p = q - \sigma_s$ . Давление на поверхность полости матрицы не является равномерно распределенным по ее высоте. Наибольшая величина давления имеет место напротив очага пластической деформации в заготовке.

Как показали совместные исследования авторов данной монографии с А.Л. Воронцовым, в результате значительного отличия распределения давления на стенку матрицы от равномерного, наблюдается ее сложный прогиб в процессе штамповки (рис. 2.5), и повышается сила деформирования. Наличие сложного прогиба матрицы, обуславливающего вытекание металла в сходящийся канал с углом обратной конусности  $\gamma_1$ , подтверждают эксперименты работы [22], показывающие, что сила закрытой прошивки тонкостенных стаканов растет до тех пор, пока стенки штампуемого стакана не станут в 2 раза выше своей толщины.

Величина упругого прогиба матрицы связана как с размерами матрицы, так и с величиной напряжения текучести деформируемого материала: чем выше это напряжение, тем больше прогиб матрицы и, соответственно, угол обратной конусности.



Рис. 2.5. Прогиб стенки полости матрицы при закрытой прошивке заготовки

Влияние прогиба матрицы на силу XOШ можно компенсировать, предусмотрев некоторую начальную конусность полости матрицы с расширением в сторону течения деформируемого материала. В то же время, с одной стороны, необоснованное завышение величины компенсирующей конусности может не удовлетворять требованиям, предъявляемым к точности размера наружной поверхности штампуемой детали, с другой стороны, занижение этой величины приведет к росту давления на пуансон, осуществляющий деформирование заготовки.

Для компенсации обратного конуса, обусловленного упругим прогибом матрицы, компенсирующую конусность полости матрицы определяют по формуле:

$$\operatorname{tg}\gamma_{1} = \frac{1.1\sigma_{s}R(1+2\mu R)[(1-\nu)R^{2}+(1+\nu)R_{H}^{2}]}{E(R_{H}^{2}-R^{2})(R^{2}-1)}, \qquad (27)$$

где E – модуль упругости, а v – коэффициент Пуассона материала матрицы. Для стали  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа, v = 0,3. В качестве примера приняты значения  $\mu = 0,1, R = 1,5, R_{\mu} = 4R = 6$  (выбраны по рекомендациям справочника [23]) и типичная имеющая место при закрытой прошивке величина степени деформации е = 0,4. Тогда, для стали 20  $\sigma_s = 710$  МПа и  $\gamma_1 = 0,5^\circ$ . Для стали 50  $\sigma_s = 1060$  МПа и  $\gamma_1 = 0,75^\circ$ . Полученные значения совпадают с рекомендациями работ [17, 23, 24].

Если изготовленный толстостенный XOШ стакан является не окончательным изделием, а предназначен для последующего утонения его стенки вытяжкой с утонением стенки через кольцевые матрицы, рассмотренной ниже в разделе 6, то выполнение операции закрытой прошивки в матрице с коническим раструбом указанной выше конусности является целесообразным. Это мотивировано тем, что сопротивление пуансона усталости на операции закрытой прошивки существенно меньше, чем на операции вытяжки с утонением стенки через кольцевые матрицы.

При отсутствии компенсирующей конусности сила закрытой прошивки будет расти до момента, пока высота образующейся цилиндрической стенки стакана не станет равной  $h_1$  (рис. 2.4), определяемой по формуле:

$$h_1 = \frac{R^2 - 1}{1 + \mu R}.$$
 (28)

В работе [22] для тонкостенных стаканов опытным путем установлена следующая экспериментальная зависимость:  $h_{1_3} = 2(R-1)$ . Сравнение вытекающих из нее экспериментальных значений с теоретическими результатами, получающимися по формуле (28) при  $\mu = 0,1$ , представлено в табл. 11.

Ход деформирования  $s_{\rm Tp}$ , при котором высота образующейся стенки стакана станет равной  $h_1$ , и рост силы закрытой прошивки прекращается, определяется по формуле:

$$s_{\rm rp} = s_0 + \frac{(R^2 - 1)^2}{R^2 (1 + \mu R)}.$$
 (29)

R	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
$h_1$	0,19	0,39	0,61	0,84	1,06
h <sub>19</sub>	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
δ, %	5,3	2,6	1,6	4,8	5,7

Табл. 11. Сравнение теоретических и экспериментальных значений высоты образующейся стенки стакана, при которой прекращается рост силы закрытой прошивки, обусловленный прогибом полости матрицы

Если текущее значение рабочего хода  $s < s_{_{тp}}$ , то удельная сила трения образующейся стенки стакана о сужающийся канал матрицы будет нарастать по зависимости

$$q_{\rm rp} = \frac{1.1 \mu R^3}{(R^2 - 1)^2} (s - s_0), \qquad (30)$$

при этом, если  $s \leq s_0$ , то следует принимать  $q_{\rm TD} = 0$ .

Если  $s \ge s_{\text{тр}}$ , то рост удельной силы трения прекращается, и ее максимальная величина остается равной значению

$$q_{\rm TP} = \frac{1.1\mu R}{1+\mu R}.$$
 (31)

При наличии компенсирующей конусности полости матрицы  $q_m = 0$ .

Анализ формулы (27) показывает, что на величину упругого прогиба матрицы влияют константы E и v, которые несущественно изменяются с изменением марки стали, из которой изготовлена матрица, также влияют диаметр полости 2R и внешний диаметр  $2R_{_{\rm H}}$  матрицы, а также напряжение текучести деформируемой заготовки  $\sigma_{_{\rm S}}$ . При этом отсутствует влияние наличия и количества бандажей вставки, при использовании бандажированной матрицы. Вставка бандажированной матрицы изготавливается из инструментальной стали, закаливаемой на *HRC* 57 ... 60. Она обладает хорошей полируемостью внутренней поверхности, высоким сопротивлением этой поверхности образованию на ней рисок и сопротивлением нарушению допуска размера полости вследствие истирания при долговременной эксплуатации. Однако, вставка не может выдерживать растягивающие напряжения. Если не обеспечить постоянно действующие в ней напряжения сжатия, создаваемые бандажами, она разрушится.

Количество бандажей определяется обеспечением плавного снижения растягивающих напряжений от 2200 МПа на внутренней поверхности полости вставки до 200 ... 300 МПа на наружной поверхности внешнего бандажа. Необходимое снижение растягивающих напряжений может быть обеспечено, при ограничении диаметра наружной поверхности внешнего бандажа, путем увеличения количества бандажей, имеющих разные значения твердости, до которых термообработаны стали, из которых они изготовлены. Значения твердостей бандажей уменьшаются от внутреннего бандажа к внешнему. При этом на величину прогиба внутренней поверхности матрицы система бандажирования практически не влияет.

## 2.3. Производство корпусов масленок

Рассматривается штамповка корпусов (рис. 2.6) масленок. Масленки устанавливают с натягом по их внешней поверхности в специальные гнезда в корпусах механизмов. Находящиеся внутри каждой масленки шарик и пружина выполняют функцию обратного клапана. Смазочный материал подается через них с помощью специального технического шприца. Штамповка корпусов масленок производится с использованием операции закрытой прошивки из заготовок (см. рис. 1.12, слева), имеющих форму цилиндра в их нижней части, боковая поверхность которого вверху плавно переходит в усеченный конус. На верхнем торце этого усеченного конуса имеется наметка, в которую на операции прошивки входит торец прошивного пуансона. Такая форма заготовки позволяет при закрытой прошивке получить форму верхней части корпуса масленки, показанную на рис. 2.6. Штамповка из бунта стали 10 заготовок нужной формы перед операцией их закрытой прошивки осуществляется на холодноштамповочном автомате мод. A411.



Рис. 2.6. Корпус масленки

Полученные штамповкой на холодноштамповочном автомате заготовки, показанные выше на рис. 1.12 (слева), подвергают разупрочняющему отжигу, сопровождаемому травлением. На заготовки наносят смазочное покрытие и смазку: проводят их фосфатирование и омыливание. Затем производят закрытую прошивку заготовок и осуществляют пробивку отверстия в их дне.

На рис. 2.7 приведена фотография штампа-полуавтомата, производящего посредством ХОШ корпуса рассматриваемых масленок.



Рис. 2.7. Штамп-полуавтомат для производства корпусов масленок

На верхней плите 1 штампа установлены пуансон 2, осуществляющий закрытую прошивку заготовки, и пуансон 3, пробивающий отверстие в дне изготовленного зарытой прошивкой корпуса. К средней плите 10 крепятся обоймы с матрицами для закрытой прошивки и пробивки дна.

Двухбандажная матрица для закрытой прошивки имеет возможность свободного хода вверх на 5 мм, что позволяет уменьшить силу закрытой прошивки полости в заготовке. Для облегчения подъема матрицы в процессе прошивки она установлена в обойме с использованием промежуточного сепаратора, содержащего многочисленные шарики. Шарики установлены с обеспечением натяга между обоймой и матрицей величиной 10 мкм. Прошивающий полость в заготовке пуансон направляется в матрице по посадке, как было описано выше при комментарии рис. 1.12.

Заготовки снимаются с пуансонов съемниками 5. Для обеспечения съема заготовки на прошивающем пуансоне предусмотрены две продольные площадки (см. рис. 1.11). На траверсе, расположенной между средней 10 и нижней 8 плитами штампа, установлен выталкиватель (см. рис. 2.10). Он предназначен для выталкивания детали из матрицы, в которой производится закрытая прошивка. Подъем траверсы при возвратном ходе пресса осуществляется тягами, размещенными в двух (из четырех имеющихся) диаметрально расположенных направляющих колонках 12.

Заготовки к рабочим позициям подаются с помощью револьверного диска 7, снабженного захватными устройствами 11. Диск приводится в движение от пневмоцилиндра 6. Шток пневмоцилиндра зубьями входит в зацепление с установленным на валу диска зубчатым сектором. Прерывание поворота диска осуществляется с помощью храпового механизма.

Для торможения диска в процессе работы служит тормоз 9. Деталь удаляется из диска выталкивателем 5. Фиксирование диска во время рабочего хода осуществляется с помощью устройства, расположенного на рис. 2.7 немного левее и ниже тормоза 9. Это устройство (см. рис. 2.8) со-



**Рис. 2.8.** Устройство для фиксации револьверного диска

стоит из корпуса *I*, подпружиненного фиксатора *2* и ролика *3*. Оно приводится в действие от того же штока пневмоцилиндра *6*, который вращает подающий заготовки револьверный диск *5*.

Штамп-полуавтомат спроектирован для работы на прессе К2130 (силой 1 МН). В конце рабочего хода пресса подается команда на электромагнит воздухораспределителя. Шток пневмоцилиндра *6* (см. рис. 2.7) отводится в исходное положение при неподвижном револьверном диске 7. При перемещении шток своим скосом нажимает на ролик 3 (см. рис. 2.8), и фиксатор 2 уходит вниз, освобождая диск **5**.

В верхнем положении ползуна пресса подается команда на электромагнит воздухораспределителя, и шток пневмоцилиндра совершает рабочий ход. Под действием храпового механизма револьверный диск переносит заготовку на следующую позицию. Одновременно шток 4 нажимает на ролик 3, и фиксатор 2 поднимается и упирается в диск. При дальнейшем повороте диска фиксатор попадает в отверстие в диске.

Фотография изготовленных ХОШ корпусов масленок приведена на рис. 2.9.



Рис. 2.9. Изготовленные ХОШ корпуса масленок

Особо отметим конструирование и некоторые расчеты деталей штампа.

Крепление верхнего, прошивающего полость в заготовке, пуансона, будет приведено ниже, в разделе 5, на рис. 5.4.

Выше, в комментарии к рис. 1.5, уже обращалось внимание, что нижний пуансон в штампе с плавающей матрицей опирается непосредственно на нижнюю плиту штампа. Практичная конструкция узла выталкивания штампованной детали имеет вид, показанный на рис. 2.10. Удельная сила на нижнем пуансоне с диаметром его рабочей части d достигает 2500 МПа, а допускаемое контактное напряжение на незакаленной нижней плите штампа равно 150...200 МПа. Поэтому диаметр D показанной на рис. 2.10 прокладки должен быть не менее 4d. При этом прокладка должна иметь достаточно большую толщину, чтобы равномерно распределить давление q на площадь нижней плиты штампа, а также иметь твердость 61...63 *HRC*, чтобы в нее гарантированно не вдавливался нижний торец опирающегося на нее сверху пуансона.

После завершения штамповки верхняя плита штампа (на рис. 2.10 не видна), жестко скрепленная с ползуном пресса, поднимается вместе с ползуном. Симметрично расположенные две тяги *3*, которые верхними своими концами соединены с верхней плитой штампа, поднимают за коромысло *2* закаленную промежуточную прокладку *I*, на которую опирается нижний пуансон. При этом изготовленная деталь верхним торцом нижнего пуансона выталкивается из матрицы.



Рис. 2.10. Конструкция узла выталкивания штампованной детали

Показанная на рис. 2.10 конструкция коромысла выталкивателя изготовлена с применением операции сварки центральной втулки и двух работающих на изгиб при выталкивании детали из матрицы отростков, имеющих высоту *h*. Эта высота выбрана из конструктивных соображений. В то же время, для обеспечения прочности отростков необходимо рассчитать их ширину b, которая на рисунке не показана, поскольку это размер в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка. Ширину отростка b рассчитывают следующим образом.

Максимальное напряжение в откоромысла выталкивателя ростке определяют по формуле M<sub>max</sub> / W<sub>-</sub>, где максимальный момент изгиба  $M_{\text{max}} = P_{\text{B}}l/2$ . В знаменателе последней формулы стоит цифра 2, поскольку каждая тяга 3 создает половину силы  $P_{-}$ , необходимой для выталкивания детали из матрицы, величина плеча *l* показана на рис. 2.10. Силу P<sub>в</sub> принимают равной 0,1 от силы P, которая создается при ХОШ детали. Осевой момент сопротивления при изгибе *W* определяют по формуле  $bh^2$  / 6. Таким образом,  $b = (0,3Pl) / (h^2[\sigma])$ , где  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение растяжения в материале тяги 3. Поскольку тяги работают с

переменными напряжениями растяжения, их не подвергают закалке. Кроме того, в зависимости от настройки длин каждой из двух тяг сдвоенными гайками, напряженными между собой, как показано на рис. 2.10, сила выталкивания может между тягами делиться не строго пополам. Поэтому напряжение [σ] целесообразно принимать величиной не более 200 МПа.

Конструкция выталкивателя из матрицы, приведенная на рис. 2.10 и использованная в штампе с револьверным диском, передающим между позициями заготовку, на фотографии на рис. 2.7 не видна. Ее можно увидеть ниже, на рис. 2.11, где приведена фотография другого штампа на прессе, в котором применена аналогичная конструкция выталкивателя.

Матрицу, показанную выше, на рис. 1.11, слева, бандажируют. Она состоит из вставки, изготовленной из стали X12Ф1и бандажа, изготовленного из стали 40Х. Вставка термообработана на твердость 57 ... 59 *HRC*, бандаж термообработан на твердость 46 ... 48 HRC. Вставка установлена в бандаж с натягом  $0,3 \pm 0,02$  мм.

Выше, в п. 1.3 (стр. 29-31), было показано, насколько существенным является правильное назначение и соблюдение допусков, с которыми изготавливается полость матрицы для ХОШ.



**Рис. 2.11.** Штамп, имеющий аналогичную приведенной на рис. 2.10 конструкцию выталкивателя детали из матрицы

В связи с этим, шлифование и полирование поверхности полости вставки матрицы осуществляется после ее установки в бандаж, поскольку в результате натяга, действующего со стороны бандажа, размер полости матрицы изменяется в меньшую сторону. Заданный чертежом собранной матрицы допуск на диаметр внешней поверхности бандажа также должен быть соблюден уже после установки матрицы в бандаж, при шлифовании внешней поверхности собранной матрицы.

# 2.4. Штамповка стальных сдвоенных втулок

В промышленности применяют детали типа сдвоенных втулок: шпульные колпачки швейных машин, корпуса электромагнитов постоянного тока, и др. Их целесообразно изготавливать закрытой прошивкой цилиндрических заготовок, комбинированной с выдавливанием осевого отростка, как показано на рис. 2.12.



Рис. 2.12. Схема комбинированной закрытой прошивки с активно направленными напряжениями контактного трения

На рисунке показан штамповый инструмент для ХОШ деталей рассматриваемого типа при активно направленных напряжениях контактного трения. Слева от оси инструмент находится в положении перед началом закрытой прошивки, а справа от оси – в конце прошивки заготовки. Заготовка 3, имеющая осевое отверстие, в которое входит рабочая часть оправки 5. размещается в матрице 2. Пуансон 1 неподвижен, а заготовка 3 деформируется относительно него под действием перемещающегося со скоростью v в направлении показанной стрелки контрпуансона 4.

Величина vм характеризует направление напряжений контактного трения по матрице.. В зависимости от направления перемещения матрицы (на схеме условно обозначено  $v_{\rm M} = 0$  или  $v_{\rm M} = 2$ ),

меняя направление напряжений контактного трения, можно создать преимущественное течение металла, соответственно, в стенку внутренней втулки или в стенку внешней втулки комбинированной детали. При этом будет обеспечено заданное соотношение высот стенок. Значение  $v_{\rm M} = 1$  соответствует закрытой прошивке в неподвижной матрице.

На рис. 2.13 фактические размеры изготавливаемой детали обозначены буквами с чертой сверху. В тоже время, в описанном ниже исследовании, приняты следующие относительные размеры:

$$R = \frac{\overline{R}}{\overline{r}}; \quad r = \frac{\overline{r}}{\overline{r}} = 1; \quad r_1 = \frac{\overline{r_1}}{\overline{r}}; \quad r_2 = \frac{\overline{r_2}}{\overline{r}}; \quad \Delta h = \frac{\Delta \overline{h}}{\overline{l}}.$$
(32)

Размер  $\Delta h$  имеет положительный знак, если длина внутренней втулки меньше длины внешней втулки, и отрицательный, если внутренняя втулка имеет большую длину, чем внешняя.

Использование относительных размеров расширяет область применения математических моделей, полученных ниже, путем обработки результатов штамповки образцов с экспериментальными размерами. Эти модели можно применять для расчета параметров зарытой прошивки при производстве деталей с размерами, отличными от размеров экспериментальных образцов. При этом для производственных деталей с заданными чертежом их размерами следует сначала перевести заданные размеры в относительные величины с использованием формул (32), а затем рассчитать параметры штамповки.
При расчете относительной удельной силы  $q/\sigma_s$  напряжение текучести деформируемого материала заготовки  $\sigma_s$  определяется по кривым истинных напряжений из справочников, например [1], в зависимости от степени деформации, рассчитываемой для рассматриваемой детали по формуле:

$$\mathbf{e} = (1 - r_1^2 + r_2^2) / (R^2 - r_2^2). \quad (33)$$

Поскольку удельная сила q имеет размерность в МПа и напряжение текучести  $\sigma_s$  также в МПа, относительная удельная сила  $q/\sigma_s$  является безразмерной величиной.



Рис. 2.13. Деталь типа сдвоенной втулки

При использовании в качестве исследуемого параметра величины относительной удельной силы, математические модели, построенные по результатам эксперимента, можно использовать для расчета удельной силы деформирования заготовок не только из той марки стали, из которой были изготовлены экспериментальные образцы, но и из сталей других марок.

Для этого по математической модели надо рассчитать величину  $q/\sigma_s$ , затем в справочнике, например [1], надо найти диаграмму истинных напряжений для той стали, которая задана чертежом изготавливаемой детали. По этой диаграмме истинных напряжений в зависимости от степени деформации, рассчитанной по формуле (33), определить напряжение текучести для заданной стали. Рассчитанную по математической модели величину  $q/\sigma_s$ надо умножить на определенную по диаграмме истинных напряжений величину  $\sigma_s$  и таким образом определить удельную силу зарытой прошивки для детали из заданной стали.

Одновременно с изменением направления преимущественного течения металла, напряжения контактного трения влияют на величину силы закрытой прошивки. Если скорость перемещения матрицы  $v_{\rm M}$  в направлении, обозначенном на рис. 2.12 стрелкой  $v_{\rm M} = 2$ , больше скорости истечения металла заготовки в стенку внешней втулки штампуемой детали, то направление напряжений трения на контакте заготовки с матрицей уменьшает силу прошивки, которую должен создать пуансон. Удельная сила, создаваемая пуансоном, уменьшается на 10 ... 15%. В результате такого уменьшения удельной силы, как можно оценить по приведенной выше на рис. 1.2 кривой сопротивления пуансонов усталости, срок службы пуансонов увеличивается примерно в 1,5 раза.

Для снижения напряжений контактного трения между стенкой внутренней втулки штампуемой детали и оправкой последняя имеет возможность перемещаться под действием трения вслед за направлением течения металла в стенку внутренней втулки. ХОШ в соответствии с приведенной на рис. 2.12 схемой можно осуществлять на специализированных прессах, конструкция которых рассмотрена ниже в п. 5.4.

Аналитически задача по определению удельной силы штамповки рассматриваемых деталей была решена в совместных с А.Л. Воронцовым работах авторов. В данной монографии эти решения не рассматриваются.

Далее описано экспериментальное исследование снижения удельной силы, действующей на прошивающий заготовку пуансон, вследствие создания активно направленных напряжений контактного трения, при изготовлении деталей, показанных на рис. 2.13. Также оценено сопротивление пуансонов усталости. Одновременно решена задача по оценке формоизменения заготовки, связанного с изменением направления, в котором действуют напряжения контактного трения.

В экспериментальном исследовании штамповали заготовки из стали 10. Подготовку заготовок проводили по следующей методике.

1. Изготовление на токарном станке исходных заготовок (см. рис. 2.12, слева, поз. 3) с шероховатостью поверхности по 8-му квалитету.

2. Отжиг заготовок по режиму: нагрев до 680 ... 700 °C, выдержка 3 ч, охлаждение с печью.

3. Травление заготовок, их фосфатирование и омыливание. Для травления применяли 30%-ный раствор соляной кислоты. После травления заготовки промывали в холодной и горячей воде. Для фосфатирования применяли раствор, состоящий из монофосфата цинка в концентрации 70 г/л и нитрата натрия 35 г/л. Температура раствора 70 ... 80 °C, время фосфатирования 10 ... 15 мин. Концентрация раствора для омыливания 50 ... 70 г/л 72%-ного хозяйственного мыла, температура около 80 °C, время омыливания 10 ... 15 мин.

План эксперимента и методика обработки экспериментальных данных для построения приводимых ниже математических моделей приняты на основании работы [21].

Матрица плана эксперимента приведена в табл. 12, а результаты, полученные экспериментально, в сравнении с рассчитанными по построенным на основе экспериментальных данных математическим моделям (34) и (35), приведены в табл. 13.

Номер опыта	R	<i>r</i> <sub>1</sub>	<i>r</i> <sub>2</sub>	$v_{_M}$	N, шт.
1	1,1	0,3	0,24	0	1200
2	1,2	0,3	0,12	1	2000
3	1,4	0,3	0	2	2900

Табл. 12. Сочетания значений факторов в каждом из опытов

Номер опыта	R	$r_1$	<i>r</i> <sub>2</sub>	$v_{_M}$	N, шт.
4	1,1	0,35	0,12	2	2000
5	1,2	0,35	0	0	3000
6	1,4	0,35	0,24	1	2500
7	1,1	0,4	0	1	1500
8	1,2	0,4	0,24	2	3200
9	1,4	0,4	0,12	0	2500

Окончание таблицы 12

Табл. 13. Результаты эксперимента

Номер а опыта М	<i>q</i> ,		$\sigma_{s}$	<i>q</i> /	$\sigma_{s}$	$\Delta h$		
опыта	MIIa	e	MIIa	эксп.	расч.	эксп.	расч.	
1	2470	0,74	650	3,8	3,798	0,12	0,122	
2	2260	0,63	610	3,7	3,698	0	- 0,002	
3	2050	0,46	520	3,9	3,898	0,25	0,25	
4	2260	0,72	650	3,5	3,498	- 0,17	- 0,166	
5	2020	0,61	610	3,3	3,296	- 0,13	- 0,131	
6	2150	0,43	510	4,2	4,198	0,17	0,169	
7	2330	0,69	640	3,6	3,6	- 0,43	- 0,427	
8	1980	0,57	600	3,3	3,296	0,35	0,349	
9	2160	0,42	510	4,2	4,198	0,1	0,1	

$$q/\sigma_{s} = 18,22 R^{2} - 43,98 R + 33,6r_{1}^{2} - 24,62 r_{1} - 8,06 r_{2}^{2} + 2,62 r_{2} - 0,17 v_{M}^{2} + 0,24 v_{M} + 34,51,$$
(34)

$$\Delta h = -6,13 R^2 + 16,4 R + 43,2r_1^2 - 31,4 r_1 + 5,37 r_2^2 + 0,02 r_2 + 0,17 v_M^2 - 0,29 v_M - 5,36.$$
(35)

На рис. 2.14 показаны некоторые из экспериментальных деталей, изготовленных в опытах, номера которых в соответствии с табл. 12 указаны в подрисуночной подписи.



Рис. 2.14. Втулки, изготовленные ХОШ: верхний ряд из стали 10, соответствующие (слева – направо) №№ опытов 1, 2, 3 из табл. 12; нижний ряд из стали 15Х

Для проверки повторяемости результатов проведенных опытов провели штамповку партии из 7 одинаковых деталей из стали 15Х, одна из которых показана на рис. 2.14, внизу, справа. Деталь имела следующие размеры (см. рис. 2.13): 2  $\vec{r} = 26$  мм; 2  $\vec{R} = 30$  мм; 2  $\vec{r}_1 = 9$  мм; 2  $\vec{r}_2 = 0$ ;  $\vec{l} = 60$  мм;  $\Delta h = 0$ . При указанных фактических размерах относительные размеры детали следующие: R = 1,2;  $r_1 = 0,35$ ;  $\Delta h = 0$ .

Расчет по модели (35) значений  $\Delta$  для значений  $v_{\rm M}$ , равных 0, 1 и 2 (см. рис. 2.12), показал, что только при  $v_{\rm M} = 2$  для рассматриваемой детали может быть обеспечена величина  $\Delta h = -0,017$ , т.е. внутренний отросток практически не будет выходить за пределы полости детали. При других значениях  $v_{\rm M}$  отросток длиннее. Таким образом, при штамповке на прессе, для ХОШ с активно направленными напряжениями контактного трения траверсу с помощью гидроцилиндров ее привода следует перемещать вверх.

Поскольку на предприятиях отсутствуют прессы для ХОШ с активно направленными напряжениями контактного трения, рассмотрена возможность изготовления детали при  $v_{\rm M} = 2$  на стандартном оборудовании. Для этого применена конструкция штампа, которая позволяла матрице перемещаться под действием контактного трения с заготовкой, аналогично перемещению оправки 5, показанной на рис. 2.12. В результате измерения 7 изготовленных в таком штампе деталей получены следующие значения  $\Delta h: -0,02; -0,01; 0,01; 0,01; 0, 02; 0,02; 0,04.$  Результаты эксперимента достаточно хорошо совпадают с результатами расчета.

Рассчитанное по модели (34) значение  $q / \sigma_s$  равно 2,59. Для определения удельной силы штамповки q по формуле (33) рассчитана степень деформации e = 0,62, и по диаграмме истинных напряжений для стали 15Х найдено  $\sigma_s = 910$  МПа. Отсюда q = 2360 МПа. Измеренные при штамповке 7 деталей значения q следующие: 2320, 2370, 2370, 2410, 2410, 2460, 2460 МПа. Расхождение расчетных и экспериментальных результатов в пределах 4%.

По результатам опытов, заданных табл. 12, оценено сопротивление пуансонов усталостному разрушению. По кривой сопротивления пуансонов усталости, приведенной выше на рис. 1.2, в соответствии со значениями *q* из табл. 13 для каждого из опытов определены значения *N*, которые записаны в крайнем правом столбце табл. 12.

С применением полученных математических моделей выполнен расчет  $q/\sigma_s$  и  $\Delta h$  для ХОШ шпульного колпачка швейной машины. Размеры шпульного колпачка (см. рис. 2.13): 2  $\bar{r} = 21$  мм; 2  $\bar{R} = 22,7$  мм; 2  $\bar{r_1} = 6$  мм; 2  $\bar{r_2} = 4,5$  мм. При штамповке детали на стандартном оборудовании и значении  $v_m = 2$  в матрице, перемещающейся под действием контактного трения,  $\Delta h = 0,033; q / \sigma_s = 3,39$ . Осевой отросток не выступает за пределы полости, как и требуется по чертежу детали. При штамповке из стали 10 для степени деформации  $e = 0,86, \sigma_s = 720$  МПа. Отсюда удельная деформирующая заготовку сила q = 2440 МПа. При такой удельной силе на практике достигается удовлетворительное сопротивление пуансонов усталости. Следовательно, шпульный колпачок швейной машины целесообразно изготавливать ХОШ.

По результатам описанного исследования видно, что деформация заготовки по схеме, позволяющей материалу вытекать в две полости инструмента (см. рис. 2.12), происходит при меньшей удельной силе на пуансоне по сравнению с ХОШ деталей типа стаканов без течения материала во внутренний отросток. Эта установленная в результате исследования закономерность позволяет рекомендовать предприятиям, выпускающим широкую номенклатуру изделий в виде стальных втулок, комбинировать разные втулки в детали показанного на рис. 2.13, 2.14 типа, производить такие детали ХОШ и разделять их на отдельные втулки.

Поскольку при одной штамповке такой комбинированной детали будет произведено сразу 2 втулки, кроме прокомментированного выше повышения сопротивления пуансонов усталости, обеспечиваемого благодаря истечению материала в две полости, сопротивление пуансонов усталости повысится еще вдвое.

При изготовлении закрытой прошивкой детали, показанной выше на рис. 1.13, вследствие неравномерного уменьшения толщины смазочного слоя под торцом пуансона, неравномерной структуры прутка, из которого изготовлена заготовка, создаются условия для увода пуансона от оси, и вблизи дна штампованной детали может иметь место неравномерная толщина стенок.

Преимуществом двухканального течения металла при закрытой прошивке деталей с внутренним осевым отростком, по сравнению с закрытой прошивкой деталей типа стаканов без внутреннего отростка, является самоцентрирование пуансона относительно оси в ходе штамповки детали. Для подтверждения этого тезиса проведен следующий эксперимент.

Заготовку для закрытой прошивки, аналогичную заготовке 3, показанной на рис. 2.12, сделали состоящей из двух половинок, разрезанных в меридио-

нальном сечении, совпадающем с осью заготовки. Одна из половинок была изготовлена из алюминиевого сплава АД1, а другая – из меди М1.

При внедрении пуансона в такую комбинированную заготовку условия неодинакового трения на половинках его торца, очень существенная неравномерность материала заготовки в ее поперечном сечении намного превышают различие этих факторов, которые могут иметь место при внедрении пуансона в заготовку, изготовленную целиком из одного материала.

Результат закрытой прошивки комбинированной заготовки из двух материалов приведен на рис. 2.15.



Рис. 2.15. Деталь, полученная закрытой прошивкой заготовки, половинки которой изготовлены из разных материалов

На фотографии видно, что в одной доле детали деформируемый материал вытек на существенно большую высоту как в ее стенку, так и в ее отросток, чем в другой доле детали. Большую высоту имеет доля детали из сплава АД1, поскольку этот сплав оказывает меньшее сопротивление пластической деформации, чем медь М1.

Если смотреть на штампованную из двойной заготовки деталь сверху, то видно, что медь в тангенциальном направлении заняла больше половины окружности штампованной детали. Объемы исходных половин заготовок из меди М1 и сплава АД1 одинаковые. Поскольку на часть детали из сплава Д1 в тангенциальном направлении осталась меньшая доля, чем половина окружности, то этот сплав вытек в стенку и в отросток детали на большую высоту, чем медь М1.

В тоже время, толщины стенок изготовленной комбинированной детали из двух материалов остались постоянными по высоте и одинаковыми для каждой из долей детали, изготовленных из разных материалов. Таким образом, подтверждено, что схема двухканального течения материала заготовки обладает свойством самоцентрирования пуансона относительно оси изготавливаемой с применением закрытой прошивки детали. Аналитически самоцентрирование пуансона при штамповке с использованием двухканального течения материала объяснено в работах авторов, опубликованных совместно с А.Л. Воронцовым, содержание которых в данной монографии не рассматривается.

# 2.5. Закрытая прошивка заготовок при создании двухканального течения металла на первом этапе деформирования

На рис. 2.15 было показано, что при двухканальном течении металла создаются условия для самоцентрирования пуансона. В результате снижается разностенность изделий. Рассматриваемый эффект двухканального течения характерен для выдавливания деталей типа стакана как с внутренним осевым отростком, так и с внешним осевым отростком. В п. 2.4 уже было отмечено, что штамповку деталей типа стаканов целесообразно осуществлять на специализированных прессах с принудительным перемещением матрицы на этапе деформирования заготовки. Для штамповки стаканов с внешним осевым отростком эффект двухканального течения и связанного с ним самоцентрирования пуансона может быть реализован при использовании способа, показанного на рис. 2.16.

На рис. 2.16 деформирование заготовки изображено при неподвижной матрице, только в результате последовательных движений верхнего (позиция a) и нижнего (позиция b) пуансонов. На специализированных прессах, снабженных дополнительным приводом для перемещения матрицы, один из пуансонов (например, верхний) может быть неподвижным, а деформирование заготовки, аналогичное приведенному на рис. 2.16, может быть осуществлено перемещением матрицы и нижнего пуансона. При этом не потребуется прерывания деформирования заготовки и кантования штампа, как на прессе стандартной конструкции, у которого перемещается только один ползун. Заключительный этап операции, показанный на рис. 2.16, b, осуществляется с раздачей стенки детали по схеме, которая была приведена выше на рис. 1.8 и предварительно прокомментирована там, а более подробно эта схема рассмотрена ниже, в п. 2.6.

Здесь рассматривается эффект самоцентрирования пуансона на первом этапе, показанном на рис. 2.16, *а*. Для проверки предположения о самоцентрировании пуансона его первоначально устанавливали на верхний торец заготовки с контролируемым эксцентриситетом и следили, изменится ли, каким образом и на сколько первоначальный эксцентриситет при закрытой прошивке полости.



**Рис. 2.16.** Два этапа единой операции деформирования заготовки: a - двухканальное течение металла в стенку стакана и в технологическую полость $с образованием отростка; <math>\delta$  – выдавливание металла из отростка в стенку стакана

Инструмент для реализации рассматриваемого этапа закрытой прошивки заготовки представлен на рис. 2.17.

Разработана методика исследования, базирующаяся на изложенных ниже основных положениях.

В качестве показателя эффективности схемы выбрано смещение пуансона  $\Delta$  к центру заготовки от заранее заданного эксцентриситета (эффект самоцентрирования пуансона) при варьировании геометрии инструмента. Спланированы и осуществлены эксперименты (так называемые, математические) на компьютере в программном комплексе DEFORM-3D.

Величины разностенности были вычислены по следующей формуле:

$$\Delta = S_{\text{HM3}} - S_{\text{BeDX}^2} \tag{36}$$

где  $S_{_{\rm Hu3}}$  – толщина стенки у дна прошитой полости (в том же месте по окружности, что и  $S_{_{\rm Bepx}}$ ),  $S_{_{\rm Bepx}}$  – толщина стенки в самой тонкой (по окружности) верхней части полости.

Положительное значение  $\Delta$  и его увеличение по мере смещения вглубь полости, т.е. смещение оси пуансона в направлении к оси матрицы, свидетельствует о наличии эффекта самоцентрирования пуансона относительно матрицы в процессе закрытой прошивки полости изделия. Отрицательное значение  $\Delta$  и его уменьшение по мере смещения вглубь полости, т.е. смещение оси пуансона от оси матрицы, свидетельствует об отсутствии самоцентрирования пуансона относительно матрицы.



**Рис. 2.17.** Схема экспериментальной оснастки в сборе: 1 – матрица; 2 – ступенчатая втулка; 3 – заготовка; 4 – пуансон

На первом этапе исследования оценена сходимость между собой результатов физических и компьютерных экспериментов при варьировании факторов на 2 уровнях. По результатам физических экспериментов построено уравнение регрессии, описывающее уменьшение эксцентриситета в процессе закрытой прошивки полости в заготовке по схеме на рис. 2.17, в основном на качественном уровне.

Проведено моделирование (математические эксперименты) в программном комплексе DEFORM-3D с теми же факторами и уровнями их варьирования, что и в физическом эксперименте. По результатам математических экспериментов так же, как и физических, построено уравнение регрессии.

Сопоставление между собой результатов экспериментов в виде двух уравнений регрессии подтвердило допустимость применения программного комплекса DEFORM-3D для данного исследования.

На втором этапе исследования проведены математические эксперименты в программном комплексе DEFORM-3D с увеличенным по сравнению с первым этапом количеством факторов, четыре из которых варьируются на 4 уровнях.

Факторы и уровни их варьирования на втором этапе исследования представлены в табл. 14.

Строилась математическая модель следующего вида:

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_6 X_6 + b_7 X_7 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{55} X_5^2 + b_{66} X_6^2 + b_{111} X_1^3 + b_{222} X_2^3 + b_{555} X_5^3 + b_{666} X_6^3.$$
(37)

Цель ее построения – определение размеров инструмента, позволяющих достичь наибольшего смещения ∆ установленного с начальным эксцентриситетом пуансона к оси изделия и таким образом получить наименьшую разностенность изделия вблизи дна полости.

i	Фактор	X <sub>i</sub>
1	Диаметр матрицы, $D_{_{\rm M}}$ , мм	60 90 120 150
2	Угол конусности у верхнего торца втулки 2 (см. рис. 2.17), α <sup>0</sup>	10 16 22 28
3	Относительная высота заготовки, <i>H</i> /D <sub>м</sub>	3 4
4	Относительный эксцентриситет в начале прошивки полости, $e/D_{_{\rm M}}$	0,02 0,04
5	Отношение диаметра матрицы к диаметру выдавливаемого стержня, $\check{R}_1 = D_{_{\rm M}}/d_{_{\rm orp}}$	1,2 1,3 1,4 1,5
6	Отношение диаметра матрицы к диаметру пуансона, $\check{R}_2 = D_{_{\rm M}}/d_{_{\rm II}}$	1,5 1,6 1,7 1,8
7	Угол конусности торца пуансона, β <sup>0</sup>	30 40

Табл. 14. Факторы и уровни их варьирования

После расчета коэффициентов модель (37) приняла следующий вид:

$$\Delta = -104,739 + 0,24772 D_{\rm M} + 1,83874 \alpha + 0,548 H/D_{\rm M} + 28,1 e/D_{\rm M} - -417,31 D_{\rm M}/d_{\rm orp} + 510,728 D_{\rm M}/d_{\rm n} + 0,0246 \beta - 0,002535 D_{\rm M}^{-2} - -0,100264 \alpha^{2} + 297,3 (D_{\rm M}/d_{\rm orp})^{2} - 313,4 (D_{\rm M}/d_{\rm n})^{2} + 0,0000085556 D_{\rm M}^{-3} + +0,001727 \alpha^{3} - 70 (D_{\rm M}/d_{\rm orp})^{3} + 64 (D_{\rm M}/d_{\rm n})^{3}.$$
(38)

Адекватность уравнения (38) результатам математического эксперимента проверена сравнением между собой значений смещения пуансона  $\Delta$ , полученных путем математического эксперимента и рассчитанных по уравнению (38). Проверка подтвердила адекватность модели.

Анализ уравнения (38) показал, что при изготовлении деталей типа стаканов методом последовательной комбинации закрытой прошивки и выдавливания с применением формоизменения, приведенного на рис. 2.16, а, рациональные размеры инструмента, при которых имеют место эффект самоцентрирования пуансона и снижение разностенности штампованной детали, следующие: диаметры матрицы  $D_{\rm u} = 60 \dots 75$  мм; 120 … 150 мм, углы конусности матрицы  $\alpha = 10 \dots 150; 24 \dots 280$ , соотношение диаметров участков полости матрицы  $D_{\rm M}/d_{\rm orp} = 1,3 \dots 1,5$ , отношение диаметра матрицы к диаметру пуансона  $D_{\rm M}/d_{\rm n} = 1,7 \dots 1,8$ , соотношение диаметра технологического отростка и диаметра пуансона  $d_{\rm orp}/d_{\rm n} = 1,2 \dots 1,3$ .

# 2.6. Закрытая прошивка заготовок с раздачей стенок деталей

Приведенные выше на рис. 1.7 заготовки в зависимости от типа изготавливаемых изделий могут служить непосредственно корпусами изделий или выполнять роль полуфабриката, подвергаемого последующей вытяжке с утонением стенки (см. раздел 6). Авторы настоящей монографии, а также А.Л. Воронцов и Н.Е. Попов, подвергли сомнению предположение о том, что снижение деформирующей силы при штамповке способом, показанным на рис. 1.8, связано с тем, что металл течет в направлении, совпадающем с направлением движения деформирующего заготовку инструмента. Это снижение объясняется рациональным сочетанием операций закрытой прошивки заготовки и последующей раздачи формирующейся стенки стакана.

Для обоснования этого экспериментально, а также методом компьютерного моделирования, исследованы величины удельной силы (усредненного осевого давления), действующей на плоский торец пуансона, осуществляющего закрытую прошивку полости. Установлено, что при пластической деформации металла заготовки удельная сила напротив торца пуансона при выполнении рассматриваемой операции имеет примерно такую же величину, как при закрытой прошивке цилиндрической полости в цилиндрической заготовке. Следовательно, новых физических явлений в деформируемом материале заготовки при этом не происходит.

Эффект снижения деформирующей силы при штамповке по схеме М. Куноги (см. рис. 1.8) достигается благодаря тому, что в начале выполнения закрытой прошивки штампуется стакан с относительной толщиной стенки R, находящейся в диапазоне  $R = 1, 5 \dots 2$ . При этом величина  $q / \sigma_s$  наименьшая (см. рис. 2.4). Кроме того, форма матрицы, в которой происходит закрытая прошивка заготовки, имеет расширяющуюся коническую поверхность, что исключает увеличение  $q / \sigma_s$  вследствие прогиба стенки полости матрицы (см. рис. 2.5). При дальнейшем деформировании заготовки составляющая силы штамповки, увеличивающей диаметр полости детали, направлена к оси заготовки и не приводит к существенному увеличению силы, создаваемой прессом.

Экспериментально исследовано изменение относительной (по отношению к напряжению текучести  $\sigma_s$ ) удельной деформирующей заготовку силы  $q/\sigma_s|r_1$ , действующей в поперечном сечении пуансона (рис. 2.18), имеющем радиус  $r_1$ , а также относительной удельной силы, действующей на торец пуансона  $q/\sigma_s|r$ .



Рис. 2.18. Схема закрытой прошивки, совмещенной с раздачей трубной части стакана

Первая из этих удельных сил в приведенных ниже математических моделях обозначена как зависимая переменная  $y_1$ , вторая – как зависимая переменная  $y_2$ . В результате проведения эксперимента изменение этих переменных описано в зависимости от перечисленных далее факторов. Первый фактор – относительный радиус матрицы  $\mathbf{r}_2 = r_2/r$  в поперечном ее сечении на уровне выхода металла из-под торца пуансона в коническую часть стакана. Второй фактор – угол конусности матрицы  $\alpha$ . Третий фактор – относительный радиус пуансона  $\mathbf{r}_1 = r_1/r$ . Четвертый фактор – соотношение тангенсов углов конусности матрицы и пуансона tg $\alpha/$ tg $\beta$ . В приведенных здесь формулах  $r, r_1$ ,  $r_2$  – радиусы пуансона в миллиметрах, показанные на рис. 2.18.

Отношение  $tg\alpha/tg\beta$  описывает дополнительное давление на деформируемый материал в стенке стакана, имеющее место в результате сужения зазора между пуансоном и матрицей. Это дополнительное давление препятствует разрыву стенки при раздаче.

Уровни варьирования факторов приведены в табл. 15.

Полный факторный эксперимент при заданном количестве уровней варьирования факторов должен включать 3<sup>3</sup> х 2 = 54 опыта. Однако на основе результатов теоретических исследований ожидается значимым влияние только главных эффектов факторов [21]. Влияние первых трех факторов нелинейное, а четвертого – линейное.

Габл. і	15.	Значения	факторов	в	эксперименте
---------	-----	----------	----------	---	--------------

Фактор	Значения фактора в эксперименте
<b>r</b> <sub>2</sub>	1,2 1,35 1,5

Фактор	Значения фактора в эксперименте
α	6° 9° 15°
<b>r</b> <sub>1</sub>	1,1 1,2 1,3
tgα/tgβ	1,15 1,25

Окончание таблицы 15

Целесообразно строить модель главных эффектов, в которую входят 8 членов:

$$y = b_0 + b_1 \mathbf{r}_2 + b_2 \alpha + b_3 \mathbf{r}_1 + b_4 \operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \beta + b_{11} \mathbf{r}_2^2 + b_{22} \alpha^2 + b_{33} \mathbf{r}_1^2.$$
(39)

ХОШ проводили в штампе со сменными матрицами и пуансонами, установленном на универсальной испытательной машине Инстрон-350, снабженной устройством для записи изменения силы по ходу деформирования. За удельную силу принято отношение силы штамповки к площади сечения пуансона на уровне наибольшего диаметра полости стакана. Штамповали заготовки диаметром 15 мм из сплава АД1. Напряжение текучести  $\sigma_s$  для расчета относительных удельных сил устанавливали по диаграмме истинных напряжений, построенной по результатам испытания образцов на сжатие. В результате деления указанной выше удельной силы на  $\sigma$ s определена относительная удельная сила  $y_i$ .

Для нахождения коэффициентов модели (39), согласно плану эксперимента, приведенному в табл. 16, достаточно провести 9 опытов. Результаты опытов записаны в двух правых столбцах табл. 16.

Удельную силу на торце пуансона измеряли с помощью листовых датчиков – профилированных медных пластин, которые прикрепляли к торцу пуансона пластилином, профилированной стороной в сторону пуансона. После выполнения ХОШ искажение профиля датчика измеряли на инструментальном микроскопе, и с помощью тарировочных кривых в зависимости от ширины сплющенного участка профиля датчика, прикрепленного к торцу деформирующего заготовку пуансона, определяли давление на торце пуансона. При этом использовали тарировочные кривые, которые строили путем сжатия профилированного датчика, аналогичного прикрепленным к торцам пуансонов, между двумя гладкими закаленными плитами. Силу сжатия варьировали, искажение (сплющивание) профиля датчика при каждой фиксированной силе измеряли на инструментальном микроскопе и строили зависимость ширины сплющенного участка профиля от действовавшего на него давления.

Nº		Значение	<i>y</i> <sub>1</sub>	<i>y</i> <sub>2</sub>		
оп.	<b>r</b> <sub>2</sub>	α	$\alpha$ $\mathbf{r}_1$ $tg\alpha/tg\beta$		$(q/\sigma_s r_1)$	$(q/\sigma_s r)$
1	1,2	6°	1,1	1,15	3,9	3,8
2	1,35	9°	1,2	1,15	1,7	2,3
3	1,5	15°	1,3	1,15	1	1,9
4	1,5	9°	1,1	1,15	1,5	1,5
5	1,2	15°	1,2	1,15	2,5	3,1
6	1,35	6°	1,3	1,15	2,1	3,5
7	1,35	15°	1,1	1,25	1,8	1,9
8	1,5	6°	1,2	1,25	1,8	2,7
9	1,2	9°	1,3	1,25	3,3	4,7

Табл. 16. Матрица плана эксперимента

Образец изготовленного ХОШ стакана приведен на рис.1.7, справа.

После проверки статистической значимости рассчитанных коэффициентов моделей (39) при доверительной вероятности 95%, исключения из моделей членов, значимость коэффициентов у которых не подтвердилась, модели приняли следующий вид:

$$q/\sigma_{s}|r_{1} = 48,76 + 20,8 \mathbf{r}_{2}^{2} - 62,16 \mathbf{r}^{2} - 0,089 \,\alpha, \tag{40}$$

$$q/\sigma_{\rm s}|r| = 4,93 + 4,8 \, \mathbf{r}_1 - 5 \, \mathbf{r}_2 - 0,112 \, \alpha.$$
 (41)

В результате анализа этих моделей установлено, что значимость членов, описывающих влияние соотношения тангенсов углов конусности  $tg\alpha/tg\beta$  матрицы и пуансона на величины действующих относительных удельных деформирующих заготовки сил, не подтвердилась. Это объясняется тем, что при формировании полости пуансонами, имеющими рассматриваемые углы конусности, вектор деформирующей заготовку силы имеет наибольшую составляющую в направлении к оси пуансона. Поэтому деформируемый металл обжимает пуансон по боковой поверхности, не внося при этом существенной добавки в величину силы, действующей вдоль оси пуансона со стороны ползуна пресса, нужной для осуществления штамповки.

Для выявления зависимостей относительных удельных сил  $q/\sigma_s|r_1$  и  $q/\sigma_s|r_2$  от каждого из трех факторов:  $\mathbf{r}_2$ ,  $\alpha$ ,  $\mathbf{r}_1$ , влияние которых признано значимым, чтобы исключить влияние других факторов, определены средние арифметические значения удельных сил для каждого значимого фактора. Эти средние значения приведены в табл. 17.

По данным из табл. 17 построены графики, приведенные на рис. 2.19.

Уровень	<b>r</b> <sub>2</sub>			α, град			<b>r</b> <sub>1</sub>		
фактора	1,2	1,35	1,5	6	9	15	1,1	1,2	1,3
$q/\sigma_{_{s}} r_{_{1}}$	3,23	1,87	1,43	2,6	2,17	1,77	2,4	2	2,13
$q/\sigma_s r$	3,87	2,57	2,03	3,33	2,83	2,3	2,4	2,7	3,37

Табл. 17. Усредненные значения относительных удельных сил

На графиках на рис. 2.19 пунктирные линии относятся к удельным силам  $q/\sigma_s|r$ , приложенным к торцам пуансонов, сплошные линии – к удельным силам  $q/\sigma_s|r_1$ , действующим в пуансонах на уровне  $r_1$  (см. рис. 2.18). Как видно на рис. 2.18, вытекающий из-под торца пуансона в стенку стакана материал заготовки подвергается раздаче на конической поверхности пуансона. Поскольку напряжения от раздачи не вносят существенный дополнительный вклад в величину силы прошивки, а площадь поперечного сечения пуансона при переходе от торца с радиусом r к калибрующему пояску, имеющему радиус  $r_1$ , возрастает существенно, имеет место снижение удельной силы  $q/\sigma_s|r_1$ .



**Рис. 2.19.** Зависимости относительных удельных сил выдавливания  $q/\sigma_s|r_1$  и  $q/\sigma_s|r_2$  от размеров инструмента: **r**<sub>2</sub>,  $\alpha$  (град), **r**<sub>1</sub>

Изложенное выше позволяет заключить, что снижение силы штамповки при использовании схемы М. Куноги является результатом рационального сочетания операций закрытой прошивки заготовки и раздачи на пуансоне стенок формирующегося при прошивке стакана. Результат такого рационального сочетания операций не зависит от того, течет ли материал деформируемой заготовки в направлении перемещения ползуна пресса или в обратном направлении.



Рис. 2.20. Штамп для закрытой прошивки, совмещенной с раздачей заготовки, в движущейся матрице

Следовательно, характерное для рассматриваемой схемы закрытой прошивки снижение величины деформирующей силы может быть получено при использовании штампа, схема которого приведена на рис. 2.20 [25].

В отличие от конструкции штампа, показанной на рис. 1.9, в штампе на рис. 2.20, установленном на обычный универсальный пресс, не возникает проблем с извлечением штампованной детали из матрицы. Оно осуществляется от выталкивателя пресса.

Штамп работает следующим образом. При опускании верхней плиты с пуансоном *1* приводится в движение съемник *4*, который в момент касания пуансоном заготовки начинает синхронно перемещать вниз матрицу *2*. По окончании закрытой прошивки выталкиватель *3* удаляет штампованную деталь из

матрицы. Если происходит застревание детали на пуансоне, она снимается при возвратном ходе ползуна пресса съемником 4.

Описанная в данном пункте проблема, возникшая в частности в связи с употреблением терминов «прямое выдавливание» и «обратное выдавливание», полностью исключается при проведении штамповки на специализированных прессах, снабженных дополнительным приводом для принудительного перемещения матрицы и рассмотренных ниже, в разделе 5.

### 2.7. Холодная объемная штамповка сквозных втулок с фланцем

Область применения XOШ деталей из коррозионно-стойких сталей ограничена большими величинами напряжения текучести этих сталей: для стали 08X18H10T, при степени деформации заготовки e = 0.6,  $\sigma_s = 360 \dots 370$  МПа. Другим ограничивающим фактором является сравнительно большое трение между заготовками из таких сталей и поверхностями инструмента. Большое трение, как и большое напряжение текучести материала заготовки, приводит к увеличению, по сравнению с XOШ деталей из углеродистых сталей, значения удельной деформирующей заготовку силы и, как следствие, к невысокому сопротивлению деформирующего заготовку пуансона усталости.

В связи со сказанным, при разработке процессов XOШ деталей из коррозионно-стойких сталей используют многопереходную штамповку с небольшими степенями деформации за переход и смазывание заготовок между переходами. Необходимость обновления смазочного покрытия исключает возможность проведения штамповки на холодновысадочных автоматах. Штамповка осуществляется на прессах.

Штампуемая деталь показана на рис. 2.21.

Технологический процесс включает в себя операции отрезки от прутка и калибровки заготовки, рис. 2.22, имеющей объем, незначительно превышающий объем детали, показанной на рис. 2.21. Процесс также включает в себя подготовительные изменяющие форму заготовки операции, показанные на рис. 2.23, которые предшествуют заключительной операции штамповки.



Рис. 2.21. Деталь из коррозионно-стойкой стали, изготавливаемая ХОШ



Рис. 2.22. Операции отрезки и калибровки исходной заготовки



Рис. 2.23. Подготовительные операции штамповки

Заготовки из коррозионно-стойких сталей с содержанием углерода до 0,1% с целью снижения напряжения их текучести перед ХОШ подвергают закалке. Это связано с тем, что такие стали в результате медленного охлаждения приобретают многофазную структуру аустенита с небольшим количеством феррита в виде карбидов. Такая многофазная структура не обеспечивает как хорошей коррозионной стойкости деталей, так и пластичности заготовок. Оба эти свойства повышаются закалкой из однофазной аустенитной области.

Заготовки после закалки очищают от окалины галтовкой в шестигранных барабанах. Скорость вращения барабана 50 ... 60 об/мин. Продолжительность галтовки 35 ... 40 мин.

После галтовки заготовки подвергают промывке в холодной воде, затем обезжиривают в ванне с подогревом до 70 ... 95 °C. Состав раствора: сода кальцинированная  $Na_2CO_3 - 70 \dots 80$  г/л, натр едкий  $NaOH - 80 \dots 100$  г/л, тринатрийфосфат  $Na_3PO_4 - 30 \dots 40$  г/л, стекло жидкое  $Na_2SiO_3 - 10 \dots 15$  г/л. Продолжительность обработки 10 ... 15 мин. При сильном загрязнении химическому обезжириванию заготовок предшествует их промывка в керосине в течение 1 мин. Далее следует промывка в горячей воде (температура около 70 °C) в течение 1 мин и травление в ванне, футерованной винипластом, с подогревом до 50 ... 70 °C.

Состав раствора для травления: кислота серная  $H_2SO_4 - 110 \dots 160$  г/л, селитра натриевая NaNO<sub>3</sub> - 20 … 30 г/л. Время травления 20 мин. После травления проводится промывка заготовок в холодной, а затем в горячей воде. Далее заготовки подвергают оксалатированию. Раствор для оксалатирования содержит щавелевую кислоту  $H_2C_2O_4 - 6$  г/л, поваренную соль NaCl - 160 … 200 г/л. Продолжительность обработки 25 … 30 мин, температура раствора 60 … 70 °C. Оксалатное покрытие является подсмазочным. В качестве смазки используется 72%-ное хозяйственное мыло. Омыливание заготовок производится в растворе с концентрацией мыла 50 … 70 г/л при температуре около 80 °C, время омыливания 10 … 15 мин. После штамповки оксалатное покрытие удаляется с поковок травлением в 20%-ном растворе серной кислоты.

Отрезка заготовок (см. рис. 2.22) проводится на дисковых пилах. Переходы штамповки, показанные на рис. 2.22, справа, и на рис. 2.23, осуществляются в отдельных штампах, устанавливаемых на прессе сначала для первого перехода, потом второго и т.д. Промежуточные заготовки после каждого из переходов ссыпаются в контейнеры, которые транспортируются по цеху погрузчиками вилочного типа. Наибольшая деформирующая сила, требующаяся для выполнения XOШ, составляет 700 кН. Для штамповки применяется кривошипный пресс марки КБ0032, имеющий номинальную силу 1,6 МН.

Авторами данной монографии разработан штамп (рис. 2.24), позволяющий осуществлять формоизменение заготовки с небольшой степенью деформации для получения трубной части детали (см. рис. 2.21), а фланец формировать путем радиального выдавливания части объема заготовки, также с небольшой степенью деформации.

Штамп на рис. 2.24, слева, находится в состоянии начала деформирования заготовки 11. Справа, на этом же рисунке, штамп изображен в полностью закрытом состоянии, когда из заготовки 11 изготовлена штампованная деталь 8. На левой половине рисунка игла 4 поднята, и ее опорный торец совпадает по плоскости с опорным торцом пуансона 5. Выталкиватель 9 также отведен в исходное положение. Это обеспечено с помощью пружины 10.

Верхняя матрица 6 поджата к нижней матрице и зафиксирована в этом состоянии захватами 1, приводимыми в движение от пневмоцилиндров 12 штампа. При ходе верхней плиты штампа вниз пуансон 5 выдавливает заготовку 11 в полость между нижней матрицей и иглой 4. При этом под действием силы трения со стороны заготовки игла 4 перемещается вниз со скоростью, превышающей скорость перемещения пуансона 5. В результате снижается сила трения, препятствующая деформированию заготовки, уменьшаются относительное перемещение заготовки по инструменту и расход ресурса слоя смазочного материала.

При окончании заполнения полости, расположенной между нижней матрицей и иглой 4, кольцо 2 конической формы, установленное на верхней плите 3 штампа, входит в контакт с захватами 1 и при дальнейшем опускании плиты 3 сдвигает эти захваты в направлении от центра штампа.

При деформировании заготовки плита 6 штампа поднимается под действием силы, действующей со стороны заготовки на торец верхней матрицы,

и между матрицами образуется радиальная полость. В эту полость вытесняется материал заготовки, и формируется фланец детали. Если бы в верхней матрице не было кармана 7, то сформировавшийся в зазоре между матрицами фланец поковки имел бы форму усеченного конуса, обращенного основанием большего диаметра вверх. Однако, поскольку в верхней матрице имеется карман 7, последний постепенно заполняется металлом заготовки от верхней своей части вниз. Излишек металла заготовки. предусмотренный при дозировании ее объема, вытесняется в расположенный под нижним торцом верхней матрицы заусенец на штампованной детали 8.



Рис. 2.24. Штамп для изготовления втулки с фланцем

После окончания штамповки ползун пресса поднимает плиту 3 штампа. При этом пуансон 5 с иглой 4 также поднимаются, и игла 4 выходит из полости штампованной детали 8. Чтобы деталь 8 гарантированно оставалась в матрице, полость матрицы прошлифована с обратным по отношению к направлению извлечения штампованной детали конусом с углом конусности 15', что не превысило заданный чертежом детали допуск на наружной ее поверхности.

К моменту, когда тяги, ввернутые в кольцо 2, начинают поднимать плиту 6, пневмоцилиндры штампа отводят захваты l в направлении от центра штампа. Поскольку угол трения между захватами l и конической кольцевой накладкой на плите 6 незначительно меньше не самотормозящего угла, сил пневмоцилиндров достаточно для отведения захватов.

Далее плита 3 штампа поднимается вместе с плитой 6 и верхней матрицей до такого положения, когда зазор между нижним торцом иглы 4 и верхним торцом нижней матрицы превышает высоту штампованной детали 8. Выталкивателем 9, приводимым в движение от выталкивателя пресса, деталь извлекается из нижней матрицы и удаляется вручную из штампа. На ее место, на зеркале нижней матрицы, устанавливается новая заготовка 11. При этом раскрывшаяся в осевом направлении пружина 10 находится в полости заготовки 11 и фиксирует эту заготовку.

При новом ходе ползуна пресса вниз игла 4 входит в полость заготовки, окончательно центрирует ее и одновременно сжимает пружину 10. Силой сжатой пружины выталкиватель 9 опускается в нижнее положение. Перемещение выталкивателя вниз облегчено тем, что нижняя матрица, как уже говорилось, имеет коническую, расширяющуюся книзу поверхность с малым



Рис. 2.25. Деталь, изготовленная ХОШ из стали 08Х18Н10Т

углом конусности, а сам выталкиватель трубный, стенки его могут упруго деформироваться в положении штампа, показанном на рис. 2.24, слева. В момент, когда верхняя матрица штампа смыкается с нижней матрицей, пневмоцилиндры штампа перемещают захваты *I* в направлении к центру штампа. На этом описанный цикл работы штампа завершается.

Штамп работает на гидравлическом прессе модели ПБ476, имеющем номинальную силу 1,6 МН, давление в пневмоцилиндрах штампа создается от пневмосети цеха.

Штампованная деталь приведена на рис. 2.25.

# 2.8. Холодная штамповка конических стаканов с цилиндрической полостью

В машиностроении применяются детали, для которых авторами данной монографии разработан процесс их производства ХОШ. Штампованная деталь приведена на рис. 2.26. Материал – сталь 10.



Рис. 2.26. Деталь, изготовленная ХОШ

Детали рассматриваемого типа целесообразно штамповать с применением формоизменяющих операций, показанных на рис. 2.27.

На первом переходе (рис. 2.27, *a*) проводят выдавливание в конической матрице цилиндрической прутковой заготовки с уменьшением ее диаметра от  $D_0$  до *D*. На втором переходе из показанного на рис. 2.27, а полуфабриката в той же матрице проводят закрытую прошивку стакана, которая завершается штамповкой его фланца. В результате (рис. 2.27, *б*) окончательно заполняется полость матрицы, высаживается фланец и оформляется верхний торец детали.



Рис. 2.27. Переходы штамповки конического стакана с цилиндрической полостью

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Операция закрытой прошивки заготовки цилиндрическим пуансоном в конической расширяющейся матрице не нашла достаточного отражения в литературе. По данным авторов данной монографии, максимальная величина удельной силы, действующей на пуансон при выполнении этой операции, существенно меньше, чем удельная сила при закрытой прошивке стакана с цилиндрическими поверхностями, имеющими диаметры *D* и *d*.

Поскольку на заключительной стадии деформирования заготовки осуществляется штамповка фланца (см. рис. 2.27, б), заключительная стадия штамповки характеризуется наибольшей величиной деформирующей заготовку силы (см. рис. 2.28).



Рис. 2.28. График изменения силы по ходу деформирования заготовки

Возрастающее в результате штамповки фланца гидростатическое давление в заготовке приводит к повышению силы, действующей на нижний торец прошивающего полость пуансона. В качестве удельной силы q оценивают силу, действующую на нижний торец пуансона, деленную на площадь торца пуансона.

Возможность реализации операции ХОШ ограничивается сопротивлением пуансонов усталости.

В результате экспериментального исследования построена математическая модель, описывающая зависимость относительной (по отношению к напряжению текучести штампуемого материала) удельной силы на пуансоне от относительного радиуса R = D/d, а также от угла конусности матрицы у.

При проведении эксперимента каждый из факторов R и  $\gamma$  варьировали на трех уровнях. Значения факторов на каждом из уровней их варьирования приведены в табл. 18.

Заданный вид математической модели следующий:

$$q/\sigma_s = B_0 + B_1 R + B_2 \gamma + B_{11} R^2 + B_{22} \gamma^2.$$
(42)

Матрица плана эксперимента в натуральном масштабе приведена во 2-м и 3-м столбцах табл. 18.

В эксперименте штамповку проводили в штампе со сменными матрицами и пуансонами, установленном на испытательной машине Инстрон-350, имевшей номинальную силу 3,5 МН, с осуществлением компьютерной записи изменения силы по ходу деформирования заготовки.

Удельную силу, действующую на торец пуансона, измеряли компьютерным моделированием, а также с использованием подкладных рельефных датчиков. Таковыми являлись старые бронзовые монеты СССР.

Nº	D		r	r	<i>x</i> <sub>2</sub>		_	$q / \sigma_s$	
опыта	ĸ	у, град	<i>x</i> <sub>0</sub>	<i>x</i> <sub>1</sub>	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>Z</i> <sub>1</sub>	<sup>Z</sup> 2	эксп.	расч.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,2	7	1	-1	-1	1	1	3,8	3,8
2	1,6	7	1	0	-1	-2	1	3,3	3,27
3	2,0	7	1	1	-1	1	1	2,9	2,93
4	1,2	8	1	-1	0	1	-2	3,6	3,63
5	1,6	8	1	0	0	-2	-2	3,1	3,1
6	2,0	8	1	1	0	1	-2	2,8	2,77
7	1,2	9	1	-1	1	1	1	3,6	2,57
8	1,6	9	1	0	1	-2	1	3,0	3,03
9	2,0	9	1	1	1	1	1	2,7	2,7

Табл. 18. План эксперимента в натуральном и кодированном масштабах и величины экспериментального и расчетного значений относительной удельной силы закрытой прошивки

Предварительно с помощью инструментального микроскопа на монетах измеряли ширину букв какой-либо из надписей. Затем проводили тарировку датчиков. Для этого монеты осаживали между закаленными плитами с плоскими торцами. Осадку проводили до достижения величин сил, равных 50, 100, 150 кН и т.д. У каждой монеты, осаженной при заданной, одной из указанных выше силе, на инструментальном микроскопе вновь измеряли ширину букв той же надписи, для которой она была измерена до осадки монеты. По результатам замеров был построен тарировочный график зависимости изменения ширины букв от величины удельной деформирующей силы. При этом удельную силу определяли как частное от деления полной силы осадки на площадь монеты в целом.

В дальнейшем на центр торца прошивающего полость пуансона устанавливали такую же монету. После окончания прошивки полости на стороне монеты, обращенной к торцу пуансона, на инструментальном микроскопе измеряли ширину букв той же надписи, что и при тарировке. Отложив изменение, по сравнению с исходной монетой, этой измеренной ширины букв на соответствующую ось построенного ранее тарировочного графика, по проекции соответствующей точки графика на другую его ось определяли величину действовавшей при закрытой прошивке удельной силы.

Проводили закрытую прошивку заготовок с диаметрами  $D_0 = 30$  мм и D = 24 мм при диаметрах пуансона d и углах  $\gamma$ , соответствующих матрице плана эксперимента (см. табл. 18). Заготовки из стали 10 были отожжены по режиму: нагрев до 680 ... 700 °С, выдержка 3 ч, охлаждение с печью. После отжига заготовки были протравлены в кислоте с целью удаления окалины, после чего фосфатированы и омылены. Напряжение текучести материала заготовок  $\sigma_s$  для определения относительной удельной силы штамповки  $q/\sigma_s$  определено по построенной на основании результатов испытания образцов на сжатие диаграмме истинных напряжений для стали 10 (см. рис. 1.1). Степень деформации заготовок e была рассчитана по формуле (1).

Результаты выполненных опытов приведены в 9-м столбце табл.18.

После расчета коэффициентов по результатам опытов [21], модель (39) приняла следующий вид:

$$q/\sigma_{a} = 10,63 + 0,625R^{2} + 0,051\gamma^{2} - 3,08R - 0,933\gamma.$$
(43)

Рассчитанные по этой модели величины *q*/ $\sigma_s$  для значений факторов, соответствующих каждому из 9 опытов, приведены в 10-м столбце таблицы.

С использованием построенной математической модели определена относительная  $q/\sigma_s$  удельная сила штамповки детали, показанной на рис. 2.26. Относительная удельная сила составила 3,57. Рассчитанное значение e = 0,694.Величина напряжения текучести для отожженной стали 10 (см. рис. 1) при этой степени деформации равна 650 МПа. Следовательно, удельная сила 2320 МПа.

При такой величине удельной силы сопротивление усталости пуансонов из стали P6M5 (ГОСТ 19205-73) оценено по кривой, приведенной ранее на рис. 1.2. Определено, что *N*>1000. При таком прогнозируемом сопротивлении пуансонов усталости для производства рассматриваемых поковок реализация процесса ХОШ признана целесообразной.

Разработанный технологический процесс состоит из следующих этапов.

1. Изготовление отрезкой от прутка на отрезных токарных станках исходных цилиндрических заготовок, со снятием фаски у одного из их торцов.

2. Термообработка заготовок. Производится отжиг по режиму: нагрев до 680 ... 700 °C, выдержка 3 ч, охлаждение с печью.

3. Травление заготовок, их фосфатирование и омыливание. Для травления применен 30%-ный раствор соляной кислоты. После травления заготовки промыты в холодной и горячей воде. Для фосфатирования применен раствор, состоящий из монофосфата цинка в концентрации 70 г/л и нитрита натрия – 35 г/л. Температура раствора 70 ... 80 °С, время травления 10 ... 15 мин. Фосфатированные заготовки после промывки были омылены. Концентрация раствора 50 ... 70 г/л 72%-ного хозяйственного мыла, температура около 80 °С, время омыливания 10 ... 15 мин.

4. ХОШ за 2 перехода (см. рис. 2.27).

Штамповка реализована с применением штампа, схема которого приведена на рис. 2.29. В штампе верхняя плита 7 с направляющими втулками 2 направляется по двум колонкам 22, установленным в нижней плите 20. На нижней плите установлена опора 21, на которую через закаленную прокладку 14 опирается бандажированная матрица 12. Матрица размещена в матрицедержателе 13, который с помощью установочных винтов 24 может смещаться в радиальном направлении. Это предусмотрено для регулировки соосности матрицы и пуансона 3.



Рис. 2.29. Схема штампа для закрытой прошивки

В пуансонодержателе 4 с помощью прижимной плиты 5 и прижимных планок 9 установлены два пуансона: первого и второго переходов штамповки. Пуансонодержатель закреплен на верхней плите штампа с помощью направляющих планок и предусмотрена возможность его перемещения.

Внутри опоры 21 расположено коромысло 17, на котором установлен нижний пуансон 15, который через закаленные прокладки 18 и 19 опирается на нижнюю плиту. Выталкивание штампованной поковки из матрицы осуществляется следующим образом. При ходе ползуна пресса вверх втулка *6* через штифты *8* передает силу тягам *16*. Тяги поднимают коромысло с установленным на нем нижним пуансоном. Последний выталкивает поковку из матрицы. Ход нижнего пуансона регулируется гайками на тягах *16*.

Для съема детали с пуансона предусмотрен съемник 10 со сменной направляющей втулкой 11. Съем детали осуществляется при упоре съемника в гайки 1, ограничивающие перемещение съемника вверх. Гайки 1 навинчены на шпильки 23, ввернутые в нижнюю плиту 20 штампа. Чтобы обеспечить упор поковки во втулку 11 при ходе пуансона вверх, на цилиндрической направляющей части пуансона выполнены две продольные плоские площадки (на рис. 2.29 не показаны), аналогичные показанным выше на рис. 1.11.

Внутренняя поверхность втулки *11* напротив указанных продольных площадок на направляющей части пуансона имеет форму, соответствующую форме поперечного сечения направляющей части пуансона. Поскольку поковка имеет круглый фланец, то секторы втулки *11* съемника, выступающие напротив удаленных площадок пуансона, при открытии штампа упираются в торец фланца поковки и снимают поковку с пуансона.

Конструкция механизма перемещения и фиксации пуансонодержателя показана на рис. 2.30.



Рис. 2.30. Конструкция механизма перемещения и фиксации пуансонодержателя

После выполнения штамповки пуансоном первого перехода оператор сжимает рычаги 3 и 4, перемещая таким образом тягу 5. Тяга размещена внутри трубы 6 и подпружинена в направлении своего перемещения пружиной 2. Сила сжатия пружины регулируется гайкой 1. Тяга передает силу руки оператора на систему тянущих планок 7 и 8. Тянущие планки выводят ползушки 9 из гнезд в неподвижно закрепленных фиксаторах 10. Положение фиксаторов выверяется при сборке штампа.

При сжатых рычагах 3 и 4 пуансонодержатель получает возможность свободно перемещаться вдоль оси паза в верхней плите штампа. Оператор устанавливает пуансон второго перехода в рабочую позицию и отпускает рычаги 3 и 4. При этом под действием пружины 2 и тяги 5 ползушки 9 вводятся в гнезда на другой паре фиксаторов 10. Включается пресс, и выполняется второй переход штамповки. При отладке штампа практически не требуется доводочных операций. Штамп надежен и удобен в работе.

Таким образом, в результате проведенного исследования, показана целесообразность производства рассматриваемых стальных поковок ХОШ цилиндрическим пуансоном в матрице с расширяющейся полостью.

При небольших сериях производства таких деталей целесообразно использовать конструкцию описанного штампа, чтобы не скапливать контейнеры с полуфабрикатами, прошедшими первую и ожидающими вторую операцию штамповки и не допускать упрочнения заготовок в течение межоперационного промежутка времени.

## 3. ЗАКРЫТАЯ ПРОШИВКА ЗАГОТОВОК СТУПЕНЧАТЫМИ ПУАНСОНАМИ

### 3.1. Особенности течения материала деформируемой заготовки

В машиностроении широкое применение находят цилиндрические детали, имеющие ступенчатые полости. Часто это детали, изготовленные из легких сплавов, например, алюминиевого сплава Д1, рис. 3.1.



Рис. 3.1. Меридиональный разрез заготовок деталей со ступенчатой полостью из сплава Д1, изготовленных холодной закрытой прошивкой

Производство таких деталей реализуют с применением операции холодной закрытой прошивки сплошной цилиндрической заготовки. Такое производство обеспечивает более высокие прочность и износостойкость деталей рассматриваемого типа, чем при изготовлении их резанием из прутка.

Это объясняется отсутствием перерезывания волокон, которые в макроструктуре прутка расположены продольно. При изготовлении детали холодной закрытой прошивкой металл огибает деформирующий его инструмент, и макроструктура штампованной заготовки имеет вид, приведенный на рис. 3.2. Металл при закрытой прошивке меняет направление своего течения в стенку стакана. Вследствие этого под торцом ступени пуансона имеют место встречные потоки металла.

Заготовки деталей со ступенчатой полостью, примеры которых приведены на рис. 3.1, могут быть изготовлены поэтапной прошивкой каждого из участков полости пуансоном соответствующего диаметра. При этом количество операций прошивки будет совпадать с количеством участков полости, имеющих разные диаметры.

Другим вариантом технологии является прошивка заготовок пуансоном, имеющим форму, совпадающую с формой полости изготавливаемой детали (рис. 3.3). При этом прошивка осуществляется за один переход.



Рис. 3.2. Макроструктура заготовки на этапе ее закрытой прошивки

При явном, на первый взгляд, преимуществе второго варианта он имеет недостаток, связанный с пониженным сопротивлением ступенчатых пуансонов усталости по сравнению с пуансонами, имеющими рабочую часть одного диаметра.

В то же время, при наличии заданных чертежом детали очень жестких требований к соосности между собой участков полости, имеющих разные диаметры, удовлетворить такие требования позволяет только зарытая прошивка ступенчатым пуансоном.

В изложенном ниже анализе использованы относительные размеры прошивающего полость в заготовке пуансона (см. рис. 3.3): относитель-

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

ный радиус матрицы  $R_1 = \frac{\overline{R_1}}{\overline{r_0}}$  и относительный радиус ступени пуансона  $r_1 = \frac{\overline{r_1}}{\overline{r_0}}$ , а также относительный радиус  $r_2 = \frac{\overline{r_2}}{\overline{r_0}}$  галтели и относительная длина  $l = \frac{\overline{l}}{\overline{r_0}}$  участка пуансона до ступени. Размеры с чертой сверху пока-

заны на рис. 3.3.



**Рис. 3.3.** Схема операции закрытой прошивки ступенчатым пуансоном и обозначения размеров детали

При закрытой прошивке заготовок из алюминиевого сплава Д1, не обладающего высокой пластичностью, по границе застойной зоны под ступенью в заготовке может образоваться трещина (рис. 3.4).



**Рис. 3.4.** Наметившаяся под ступенью пуансона трещина, связанная с высокой деформацией сдвига металла по границе застойной зоны; заготовка с размерами:  $R = 2, r_1 = 1, 6, l = 2$ 

Указанная трещина образуется при небольших величинах  $r_2$  (небольшой ширине ступени пуансона). При широкой ступени образования трещины не наблюдается (рис. 3.5).



**Рис. 3.5.** Отсутствие трещины ниже ступени большой ширины; заготовка с размерами: *R* = 2,85, *r*<sub>1</sub> = 2,6, *l* = 2,8

При малой величине галтели  $r_2$  вероятность появления трещины под ступенью пуансона зависит от величины среднего напряжения (гидростатического давления) в деформируемой заготовке ниже ступени пуансона. Закрытая прошивка заготовок из алюминиевого сплава Д1 при изменении радиусов инструмента *R* в пределах от 1,25 до 3,3 и  $r_1$  от 1,1 до 2,6 показала, что при  $r_1 = 2,3$  отсутствие трещины определяется условием  $R - r_1 \le 0,55$ ; при уменьшении  $r_1$  до 1,35 трещина отсутствует при  $R - r_1 \le 0,15$ . При разности  $R - r_1$  (толщина стенки детали) больше указанных величин необходимо применять пуансон, форма которого позволяет исключить застойную зону под ступенью.

Форма и размер застойной зоны под ступенью зависят от длины участка пуансона до ступени. При длине участка пуансона до ступени, достаточной для существования двух раздельных очагов пластической деформации под торцом пуансона и торцом ступени (см. рис. 3.4), направление течения металла меняется трижды: на кромке торца пуансона, на границе застойной зоны под торцом ступени и на кромке ступени.

При уменьшении длины участка пуансона до ступени наступает стадия, когда характер течения изменяется, рис. 3.6. Одновременно изменяется форма застойной зоны под ступенью. Пуансон с прилегающими застойными зонами принимает форму, которая обтекается деформируемым металлом плавно, без резких изменений направления течения. Очаги пластической деформации под торцами пуансона и ступени сливаются в один общий очаг.

При слиянии очагов пластической деформации течение металла можно схематизировать как ограниченное двумя сферическими поверхностями, см. рис. 3.6. Центр сфер расположен на оси детали на уровне торца участка полости большего диаметра.



**Рис. 3.6.** Слияние двух очагов пластической деформации в общий очаг; заготовка с размерами: *R* = 1,5, *r*, = 1,35, *l* = 1,0

Изменение характера течения происходит при такой длине участка пуансона до ступени, когда образующийся объединенный очаг пластической деформации имеет объем, равный объему двух раздельных очагов под торцами пуансона и ступени. При этом условии с точки зрения минимума энергии, затрачиваемой на протекание процесса, объяснимо наблюдаемое изменение характера течения металла.

При дальнейшем уменьшении длины участка пуансона до ступени общий очаг пластической деформации, показанный на рис. 3.6, уменьшается в своем объеме, рис. 3.7.



**Рис. 3.7.** Уменьшение объема общего очага пластической деформации, по сравнению с его объемом на рис. 3.6, при уменьшении длины участка пуансона до ступени; заготовка с размерами: *R* = 1,5, *r*<sub>1</sub> = 1,35, *l* = 0,4

Описанные выше исследования течения при закрытой прошивке ступенчатыми пуансонами с острым внутренним углом под ступенью или галтелью  $r_2$  (см. рис. 3.3) небольшого радиуса представляют практический интерес при таких соотношениях размеров инструмента, когда возможно изготовление прошивкой заготовки детали без трещины под ступенью. В других случаях пуансон конструируют не с острым углом под ступенью, а с переходом в виде конуса или галтели достаточно большой величины.

Под галтелью  $r_2$  недостаточно большого радиуса понимается величина галтели (рис. 3.8), укладывающейся в размер застойной зоны, которая образуется при остром внутреннем угле под ступенью пуансона (см. рис. 3.4).



**Рис. 3.8.** Заготовка, выдавленная пуансоном с галтелью недостаточно большого радиуса:  $R = 2, r_1 = 1, 6, l = 2$ 

Возможность свободного выбора размеров галтели  $r_2$  под ступенью рабочей части пуансона обуславливается чертежом заданной машиностроительной детали, например, чертежом, приведенным на рис. 3.9.

При последующей обработке резанием изготовленных штамповкой заготовок деталей, показанных на рис. 3.9, будут нарезаться резьбы с размерами  $d_2$  и  $d_3$ . Для выхода резца при нарезании резьбы  $d_2$  вытачивается канавка, имеющая ширину  $l - l_2$ . Поэтому у штампованных заготовок показанных деталей в области перехода от участка полости под выполнение резьбы  $d_2$  к участку полости под выполнение резьбы  $d_3$  можно предусмотреть галтель большого размера, которая будет удалена на стадии вытачивания канавки.

На рис. 3.10 показана макроструктура заготовки, прошитой ступенчатым пуансоном с коническим переходом под ступенью. Угол  $\alpha$  при вершине конуса 90°. На макроструктуре показанной заготовки с размерами R = 2;  $r_1 = 1,6$  дефектов не видно. Пуансон сконструирован рационально.

Для закрытой прошивки заготовки детали с размерами R = 2;  $r_1 = 1,35$  целесообразно конструировать пуансон с углом при вершине конуса  $80^{\circ}$ . За-

готовку детали с размерами R = 2;  $r_1 = 1,8$  без трещины под ступенью можно получить, применяя пуансон с углом конуса  $120^{\circ}$ .

Обобщая сказанное, можно рекомендовать применять пуансоны со следующими углами конусности  $\alpha$ : при  $R - r_1 \ge 0,65 \rightarrow \alpha \approx 80^\circ$ ; при  $R - r_1 < 0,65$  и  $r_1 > 1,2 \rightarrow \alpha \approx 120^\circ$ ; при  $r_1 < 1,2 \rightarrow \alpha \approx 90^\circ$ .



D h12	<i>d</i> <sub>1</sub> H12	<i>d</i> <sub>2</sub>	<i>d</i> <sub>3</sub>	$d_4$ H8	<i>d</i> <sub>5</sub> H12	<i>L</i> h12	<i>l</i> ±0,4	$l_{1}^{l_{1}}$ ±0,2	$l_{2}^{1}_{\pm 0,4}$
19	16	M14	M7	7,5	16	30	22	3	17
35	30	M28	M20x1,5	20,2	30	48	34	5	25

Рис. 3.9. Чертеж деталей, изготавливаемых из штампованных заготовок



**Рис. 3.10.** Исключение трещины при закрытой прошивке пуансоном с коническим переходом под ступенью; деталь с размерами  $R = 2, r_1 = 1, 6, l = 2$ 

При выполнении перехода с галтелью большого радиуса трещины под ступенью не образуется. Однако такая форма галтели не полностью совпадает с линиями течения металла заготовки, видными на макроструктуре, рис. 3.4. Даже при радиусе галтели  $r_2 = 2$  на границе с ней имеет место зона, в которой деформируемый металл отстает от течения соседних слоев рис. 3.11.

Для нахождения наилучшей формы галтели проведен следующий эксперимент. Заготовка с предварительно выточенной полостью (рис. 3.12) заполнялась более пластичным материалом (наполнителем), и проводилась ее закрытая прошивка ступенчатым пуансоном.



**Рис. 3.11.** Заготовка, выдавленная пуансоном с галтелью большого радиуса:  $R = 2, r_1 = 1, 6, l = 2, r_2 = 2$ 

Для заготовки из свинца наполнителем являлся парафин. Избыток наполнителя вытеснялся в зазор между пуансоном и матрицей, а оставшийся наполнитель заполнял объем определенной формы. Поверхность раздела металла заготовки и наполнителя принята за наилучшую форму галтели.



Рис. 3.12. Эксперимент по определению наилучшей формы галтели

При деформировании по приведенной схеме (см. рис. 3.12) наполнитель принимает форму, обусловленную равномерным всесторонним сжатием (гидростатическим давлением). При напряженном состоянии всестороннего сжатия на все точки поверхности галтели действуют одинаковые напряжения, и обеспечивается наименьшая концентрация напряжений.



Рис. 3.13. Обозначения размеров пуансона с «обтекаемой галтелью»

Табл. 19. Координаты «обтекаемой галтели» пуансона

Этим же требованиям отвечает «обтекаемая галтель» (рис. 3.13), т.е. форма сопряжения для ступенчатого вала, позволяющая получить на контуре равномерные напряжения (близкий к 1,0 коэффициент концентрации напряжений). Координаты «обтекаемой галтели» пуансона приведены в табл. 19. Линия раздела наполнителя и деформируемого металла представляет собой линию тока, что обеспечивает от-

сутствие трещины по границе застойной зоны под ступенью.

На рис. 3.14 приведена макроструктура детали, изготовленной закрытой прошивкой заготовки пуансоном с «обтекаемой галтелью».

$x / (d_1 - d_0)$	0	0,015	0,051	0,14	0,26	0,43	0,6	0,88	1,25	1,62
$y / (d_1 - d_0)$	0	0,05	0,12	0,2	0,27	0,35	0,4	0,45	0,48	0,5



Рис. 3.14. Заготовка детали, изготовленная закрытой прошивкой пуансоном с размерами  $R = 2, r_1 = 1, 6, l = 2, с$  «обтекаемой галтелью» (см. табл. 19)
Чтобы проверить, дает ли аналогичный эффект выполнение поверхности перехода под ступенью пуансона в виде «обтекаемой галтели», построенной не от кромки ступени, проведена прошивка заготовки пуансоном с такой поверхностью перехода (рис. 3.15).

В этом случае у кромки ступени течение металла отклоняется от контура переходной поверхности, и имеет место застойная зона, по границе которой может образоваться трещина.



**Рис. 3.15.** Заготовка, прошитая пуансоном с «обтекаемой галтелью», контур которой построен не от кромки ступени: R = 2,  $r_1 = 1,8$ , l = 2

Следовательно, контур «обтекаемой галтели» надо строить всегда от кромки ступени пуансона, и масштаб галтели определяется разностью диаметров ступени и торца пуансона до ступени. Размеры галтели целесообразно задавать в зависимости от разности указанных диаметров, как это сделано в табл. 19.

# 3.2. Экспериментальное исследование деформирующих заготовки сил

Закрытая прошивка ступенчатым пуансоном, по сравнению с прошивкой каждого участка полости гладким пуансоном соответствующего диаметра, имеет не только преимущества в обеспечении строгой соосности между собой участков полости и в сокращении количества штамповочных операций, но и недостаток. Существующий недостаток заключается в увеличении удельной деформирующей силы прошивки, что связано с изменениями направления течения металла и взаимным влиянием потоков деформируемого материала из-под торца пуансона вверх и от торца ступени вниз. При увеличенной таким образом деформирующей силе, ступенчатый пуансон испытывает концентрацию напряжений: силовую – на участке между торцом пуансона и торцом ступени и геометрическую – в галтели под ступенью.

Руководствуясь сказанным, сопоставление двух вариантов технологического процесса ХОШ деталей со ступенчатой полостью: закрытой прошивки полости ступенчатым пуансоном за один переход и попереходной прошивки участков полости гладкими пуансонами соответствующих диаметров, – целесообразно производить с технико-экономических позиций. Учитывают количество задействованного производственного оборудования, занятых площадей, количество обслуживающего их персонала, стоимость пуансонов и т.п. Для проведения такого сопоставления необходимо знание деформирующей силы при закрытой прошивке ступенчатым пуансоном.

С целью определения величины деформирующей силы при формах инструмента и схемах деформирования, позволяющих получить качественное изделие и уменьшить деформирующую силу, а также с целью определения зависимости деформирующей силы от длины пуансона до ступени проведено следующее исследование.

Лабораторный экспериментальный штамп показан на рис. 3.16. Комплект инструмента для лабораторного эксперимента приведен на рис. 3.17.

Штамп (см. рис. 3.16, 3.17) состоит из матрицы *I* и набора ступенчатых пуансонов 2. Деформируемая заготовка 3 опирается на выталкиватель 4. При этом под действием напряжений контактного трения на наружной поверхности деформируемой заготовки матрица перемещается в направлении течения металла. Таким образом, прошивка заготовки ступенчатым пуансоном происходит, в так называемой, плавающей матрице.



**Рис. 3.16.** Лабораторный экспериментальный штамп

Рис. 3.17. Комплект инструмента для лабораторного эксперимента

Для оценки снижения деформирующей силы при закрытой прошивке в плавающей матрице, по сравнению с прошивкой в неподвижной матрице, проведен базовый эксперимент с закрепленной матрицей. Закрепление осуществлено с помощью устройства, показанного на рис. 3.18. В этом устройстве между фланцами *1* и *4* посредством стяжных шпилек *3-5-6* зажата матрица со вставленным в нее выталкивателем. Выталкиватель опирается на закаленную прокладку *2*. Пуансон проходит через отверстие в верхнем фланце *4*.

Графики изменения силы по ходу закрытой прошивки ступенчатым пуансоном имеют вид, представленный на рис. 3.19. На этих графиках оценено влияние скорости деформирования на величину деформирующей силы при прошивке заготовок из сплава Д1.

Опробованные скорости отличаются между собой в пределах 10 раз. Закрытая прошивка проведена пуансоном с диаметром участка до ступени 10 мм, длиной этого участка 10 мм и диаметром ступени 16 мм в матрице с цилиндрической рабочей поверхностью ø20. Сравнение сил при скоростях деформирования 5 мм/мин и 50 мм/мин показывает, что расхождение в пределах 15%, т.е. изменение на порядок скорости деформирования оказывает существенно меньшее изменение величины деформирующей силы. Во всех описанных далее экспериментах скорость деформирования равнялась 10 мм/мин.

На участке *a-b-с* графиков, приведенных на рис. 3.19, происходит внедрение пуансона до ступени. Участок *a-b* соответствует осадке заготовки до заполнения металлом свободного пространства в матрице и начальной стадии внедрения пуансона в заготовку.

В точке **b** начинается стадия закрытой прошивки заготовки торцовым участком пуансона, которая продолжается до точки **c**. Начиная с точки **c** происходит внедрение ступени пуансона. Сила в начале возрастает резко – участок **c**-**d**, а далее это возрастание происходит более плавно, но непрерывно до конца закрытой прошивки заготовки (участок **d**-**e**). Возрастание деформирующей силы на участках **b**-**c** и **d**-**e** объясняется увеличением силы трения в результате увеличения площа-



Рис. 3.18. Устройство для закрепления матрицы от ее осевого перемещения



**Рис. 3.19.** Влияние скорости деформирования на величину деформирующей силы

ди контакта деформируемого металла с инструментом, упрочнением материала заготовки, а также влиянием упругого прогиба стенки полости матрицы, рассмотренного выше в п. 2.2 (рис. 2.5). Следует подчеркнуть, что сконструировать ступенчатый пуансон с калибрующим пояском у торца его участка до ступени нельзя. Это позволило бы снизить трение и, как следствие, угол наклона графика (см. рис. 3.19) на участке **b**-**c**. Однако, в связи с тем, что вытекающий из-под торца пуансона деформируемый материал на участке ниже ступени пуансона встречает сопротивление со стороны ступени, он заполняет зазор выше калибрующего пояска, расположенного у торца пуансона. В результате становится невозможным снятие детали с пуансона. Поэтому пуансон конструируют, как показано на рис. 3.3.

С целью оценки уменьшения влияния трения и прогиба полости матрицы проведен эксперимент по закрытой прошивке цилиндрической заготовки в матрице с конической рабочей поверхностью, расширяющейся в сторону течения металла, рис. 3.20. Угол конусности матрицы α = 20.

В штампе для направления цилиндрической части пуансона 3 внутри конической полости матрицы 1 предусмотрена направляющая втулка 2, плотно входящая в цилиндрическое расширение полости матрицы. У цилиндрической исходной заготовки 4 при ее закрытой прошивке меняются ее внешняя форма и ее диаметр. Это изменение неравномерно по высоте изготовленной детали. Под торцом ступени пуансона конусность детали



Рис. 3.20. Конструкция экспериментального штампа при конической рабочей поверхности матрицы

совпадает с конусностью полости матрицы. Выше ступени пуансона деталь имеет меньшую конусность, чем конусность полости матрицы. После окончания операции прошивки матрицу кантуют на 180°, устанавливают ее на столе пресса на подкладную толстостенную втулку, имеющую достаточную высоту, и изделие выталкивают вниз, нажимая прессом на выталкиватель 5. При этом выталкиватель удаляет из матрицы как пуансон с находящейся на нем деталью, так и направляющую втулку 2.

При сравнении величин деформирующих заготовки сил в закрепленной матрице, в плавающей матрице и в конической матрице проведена закрытая прошивка заготовок из сплава Д1 пуансонами, размеры которых приведены в табл. 20. Закрытая прошивка в конической матрице проводилась пуансонами с размерами, приведенными в табл. 21. Все пуансоны имели переход под ступенью в виде острого внутреннего угла. Матрица с цилиндрической полостью имела диаметр 20 мм, с конической полостью – диаметр меньшего поперечного сечения конуса 18 мм. Длины участков до ступени у всех пуансонов при прошивке в цилиндрической матрице 10 мм, в конической матрице 7 мм.

Табл. 20. Размеры ступенчатых пуансонов (отмечены \*) при закрытой прошивке в цилиндрической матрице

2 <i>г</i> <sub>0</sub> , мм 2 <i>г</i> <sub>1</sub> , мм	7	10	13,5	16	18
7	*				
10	*	*			
13,5	*	*	*		
16	*	*	*	*	
18	*	*	*	*	*

Табл. 21. Размеры ступенчатых пуансонов (отмечены \*) при закрытой прошивке в конической матрице

2 <i>г</i> <sub>0</sub> , мм 2 <i>г</i> <sub>1</sub> , мм	6	8	10	14
6	*			
10	*	*	*	
14	*	*	*	
16		*	*	*

Величины сил закрытой прошивки пуансонами с указанными в табл. 20 и 21 размерами и результаты их сопоставления зафиксированы в табл. 22, 23.

Обозначено:  $q_{3\pi}$  – удельная сила закрытой прошивки заготовок в цилиндрической закрепленной матрице,  $q_{\pi\pi}$  – в цилиндрической плавающей матрице;  $q_{\kappa}$  – в конической матрице; A – относительное снижение удельной силы прошивки в плавающей матрице по сравнению с закрепленной;

B – относительное снижение удельной силы прошивки в конической матрице по сравнению с закрепленной. Величины A и B рассчитаны по формулам:

$$A[\%] = (q_{3\Pi} - q_{\Pi}) \ 100 \ / \ q_{3\Pi}; \ B[\%] = (q_{3\Pi} - q_{\kappa}) \ 100 \ / \ q_{3\Pi}.$$

Из табл. 22 следует, что закрытая прошивка в плавающей матрице позволяет получить снижение деформирующей силы на величину до 13% по сравнению с закрытой прошивкой в закрепленной матрице. Такое снижение силы для прошивки ступенчатым пуансоном является большим, чем при гладком, величина которого была исследована выше, в п. 2.2.

Матрица	цилин закреп	ндрич. ленная	цилин плава	ідрич. ющая	конич	еская
Пуансон: 2 <i>г</i> <sub>0</sub> или 2 <i>г</i> <sub>0</sub> /2 <i>г</i> <sub>1</sub> , мм	Р <sub>зп</sub> , кН	<i>q</i> <sub>зп</sub> , МПа	Р <sub>пл</sub> , кН	$q_{_{\Pi\Pi}}, \ M\Pi a$	Р <sub>к</sub> , кН	$q_{\kappa}$ , MIIa
7	39	1000	36	935	37	960
10	78	1000	76	950	78	1000
13,5	155	1080	140	980	150	1050
16	-	-	230	1150	200	1000
18	360	1420	330	1300	305	1200
7/10	110	1400	105	1350	90	1150
7/13,5	180	1250	165	1150	150	1050
7/16	255	1275	230	1150	220	1100
7/18	370	1450	330	1300	320	1250
10/13,5	210	1470	195	1365	170	1200
10/16	300	1500	260	1300	240	1200
10/18	450	1770	415	1635	345	1350
13,5/16	360	1800	330	1650	270	1350
13,5/18	-	-	470	1850	370	1450
16/18	-	-	-	-	400	1580

Табл. 22. Силы закрытой прошивки заготовок в цилиндрической закрепленной, в плавающей и в конической матрицах

Пуансон	7	10	13,5	18	7/10	7/13,5
A	6,5	5	9,2	8,5	3,5	8
В	4	0	2,8	15,5	18	16
Пуансон	7/16	7/18	10/13,5	10/16	10/18	13,5/16
A	9,8	10,4	7,2	13,3	7,6	8,3
В	13,7	13,8	18,3	20	23,7	25

**Табл. 23.** Относительные снижения удельных сил закрытой прошивки при применении плавающей (A) и конической (B) матриц, в %

Разброс данных по снижению деформирующей силы при закрытой прошивке в плавающей матрице отчасти объясняется несовершенством устройства (рис. 3.18) для закрепления матрицы. Подъем матрицы при от-

сутствии ее закрепления незначителен (до 2 мм). Неравномерность затяжки гаек в применяемом устройстве для закрепления матрицы уменьшает различие, фиксируемое при сравнении прошивки в закрепленной и плавающей матрицах.

Закрытая прошивка в плавающей матрице уменьшает препятствующие течению металла напряжения трения на границе заготовки с матрицей, но не исключает их. Поэтому подготовка поверхности исходной заготовки и применение смазки позволяют снизить деформирующую силу при закрытой прошивке заготовок в плавающей матрице. Кроме того, качество подготовки поверхности заготовки перед прошивкой существенно влияет на качество поверхности изготовленной детали (рис. 3.21, 3.22).

При закрытой прошивке в матрице с полостью, расширяющейся с углом конусности 20 в сторону истечения металла заготовки, можно получить снижение деформирующей силы на величину до 25% по сравнению с прошивкой в матрице с цилиндрической полостью. Однако при этом сравнении, так же, как в описанном выше сравнении сил закрытой прошивки в плавающей и закрепленной матрицах, следует учитывать особенности конструкций матриц.



Рис. 3.21. Качество внешней поверхности детали, показанной на рис. 3.2, изготовленной закрытой прошивкой заготовки, не подвергнутой анодированию ее поверхности



Рис. 3.22. Качество внешней поверхности детали, показанной на рис. 3.2, изготовленной закрытой прошивкой анодированной заготовки

Выше, в п. 2.2, было рассмотрено влияние упругого прогиба стенки полости матрицы, как фактора, увеличивающего силу закрытой прошивки заготовки. Расширяющаяся конусность полости матрицы этот прогиб компенсирует и позволяет достичь указанного здесь снижения деформирующей заготовку силы. Однако, если увеличить внешний диаметр матрицы с цилиндрической полостью (см. рис. 3.16) и толщину ее станки, прогиб стенки под давлением, имеющем наибольшую величину напротив очага пластической деформации заготовки, станет меньше. При ступенчатом пуансоне прогиб стенки матрицы имеет место напротив двух очагов пластической деформации. Как следствие, в результате увеличения толщины стенки матрицы уменьшится эффект снижения деформирующей силы вследствие применения матрицы с расширяющейся конической полостью.

Сопоставление графиков сила – ход пуансона при выполнении операции закрытой прошивки заготовок в цилиндрической и конической матрицах



Рис. 3.23. Сопоставление графиков сила – ход пуансона при выполнении закрытой прошивки заготовок в цилиндрической и конической матрицах

для пуансона с размерами  $R = 1,5; r_1 = 1,2;$ l = 0,75 приведено на рис. 3.23. Графики отличаются между собой формой в начале деформирования заготовок и наклоном кривых на стадиях их закрытой прошивки. Различие на начальном участке объясняется осадкой исходной цилиндрической заготовки при ее деформировании в конической матрице. Заготовка на стадии внедрения участка пуансона до ступени принимает коническую форму, соответствующую форме полости матрицы. На стадиях внедрения пуансона в заготовку при конической поверхности полости матрицы увеличение деформирующей заготовку силы незначительно.

При закрытой прошивке заготовки в матрице с цилиндрической полостью происходит более интенсивный рост деформирующей силы. Поскольку упрочнение материала заготовки примерно одинаковое, при ее прошивке в матрицах с цилиндрической и конической полостями различие в интенсивности роста деформирующей силы объясняется влиянием упругого прогиба стенки цилиндрической полости матрицы, а также связанным с ним увеличением трения между заготовкой и матрицей. Здесь заметим, что на стадии внедрения ступени пуансона (участок *d-e* на рис. 3.19) влияние трения может быть уменьшено применением пуансона с калибрующим пояском выше ступени, рис. 3.3. Поэтому в проведенных экспериментах силы измеряли в точке *d* графиков. Именно эти силы зафиксированы в табл. 21.

Для оценки влияния формы перехода под ступенью пуансона на величину силы закрытой прошивки выполнен эксперимент по прошивке заготовок пуансонами, размеры которых и форма перехода показаны на рис. 3.24.



Рис. 3.24. Поверхности перехода под ступенью у примененных в эксперименте пуансонов: а) острый внутренний угол, б) галтель малого радиуса, в) «обтекаемая галтель»; г) усеченный конус малой высоты; д) галтель большого радиуса; е) усеченный конус большой высоты

Закрытая прошивка заготовок из алюминиевого сплава Д1 проведена в матрице диаметром 20 мм. Все пуансоны имели размеры: R = 2,  $r_1 = 1,6$ , l = 2. При равных величинах деформирующей силы (400 кН) определено, какое расстояние прошел каждый из исследуемых пуансонов в процессе деформирования заготовки, рис. 3.25.

Установлено, что наибольшее расстояние прошел пуансон с острым внутренним углом под ступенью (см. рис. 3.24, *a*). Это равносильно тому, что при прошивке детали с заданной глубиной полости деформирующая сила при такой форме перехода под ступенью пуансона наименьшая.

Несколько больше величина деформирующей силы при галтели под ступенью, имеющей радиус  $R - r_1$  (см. рис. 3.24,  $\delta$ ). В тоже время, как видно на рис. 3.4 и 3.8, при этих пуансонах, создающих наименьшие деформи-

рующие заготовки силы, в заготовках имеют место застойные зоны ниже ступени и могут образоваться трещины.

При закрытой прошивке остальными из рассмотренных (см. рис. 3.24) вариантов пуансона застойная зона под ступенью устранена, что исключает образование трещин. Наименьшая деформирующая сила при отсутствии в заготовке застойной зоны под ступенью пуансона соответствует пуансону с «обтекаемой галтелью».



**Рис. 3.25.** Графики изменения силы закрытой прошивки пуансонами, показанными на рис. 3.24

Следовательно, форма пуансона с «обтекаемой галтелью» является наилучшей при холодной закрытой прошивке за один переход заготовок из малопластичных алюминиевых сплавов (на примере сплава Д1).

Для оценки влияния длины участка пуансона до ступени на величину деформирующей силы проведено сравнение сил при закрытой прошивке пуансонами с одинаковыми радиальными размерами, но с различной длиной участка пуансона до ступени. В матрице с цилиндрической рабочей поверхностью Ø20 мм выполнена закрытая прошивка заготовок пуансонами с радиусами R = 2;  $r_1 = 1,35$  и R = 2,85;  $r_1 = 2,3$ . Исследованные длины участка пуансона до ступени в табл. 24 и 25.

R	14	е	R	r.	e
1,25	1,1			1,35	
1,3	1,15	1,2	2	1,6	2
15	1,2	45		1,8	
,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	1,35	1,5		1,25	
10	12	0,9	2,2	1,75	2
7,0	7,5	1,4		. 2	
	125	9,5		1,4	
1,7	1,20	1		1,9	6,0
	1,5	0,5			1,6
18	1,4	15	285		1,8
1,0	1,6	1,5	400	2,3	2
1,95	1,35	1			2,2
		0,8			2,8
		1		2,6	2,8
2	1,35	1,2	3	1,65	12
		1,4	5	2,3	1,5
		1,7	3,3	2,1	0,9

Табл. 24. Матрица с цилиндрической рабочей поверхностью

Табл. 25. Матрица с конической рабочей поверхностью

R	r4	е	R	r <sub>i</sub>	е
		0,5			1
1,25	1,1	0,88		1,6	1,2
		1,2	E		2
15	1,2	45		1,8	2
1,5	1,35	1,5		1,4	
	1,35	2		1,9	40
		0,2			1,6
		0,3	285		1,8
2	16	0,4	2,00	2,3	2
	7,0	0,5			2,2
		0,6			2,8
		0,8		2,6	2,8

Исследование проведено на заготовках из алюминиевого сплава Д1. С целью расширения применимости результатов исследования на штамповку деталей со ступенчатыми полостями из других марок алюминиевых сплавов, измеренные удельные деформирующие силы переведены в относительные величины:  $q/\sigma_s$ . Значения  $\sigma$ s определены по кривой, приведенной на рис. 3.26 [1].

Величина степени деформации е при точном аналитическом решении задачи по закрытой прошивке ступенчатым пуансоном определена авторами данной монографии совместно с А.Л. Воронцовым. Приближенная оценка величины степени деформации, как и при закрытой прошивке пуансоном без ступени, может быть проведена по формуле (1).



Рис. 3.26. Кривые упрочнения при сжатии отожженных алюминиевых сплавов: 1 – АД1; 2 – Амг2М; 3 – Д1

На рис. 3.27 приведены величины относительных удельных деформирующих сил при закрытой прошивке в плавающей матрице и в матрице с конической рабочей поверхностью.

На графиках видно, что для ступенчатых пуансонов, у которых диаметр участка до ступени значительно меньше диаметра участка ступени (например, пуансон  $r_0^-=3,5$  мм;  $r_1^-=9$  мм), сила закрытой прошивки лишь немного превышает силу для пуансона без торцевого участка и ступени, имеющего радиус калибрующего пояска 9 мм. Таким образом, составляющая от силы, действующей на торец пуансона, оказывает малое влияние на величину общей деформирующей заготовку силы *P*.

Для удельной силы ее общая величина рассчитывается как Р / ( $\pi r_1^{-2}$ ). В этой общей величине составляющая от удельной силы на торце пуансона  $P_0 / (\pi r_1^{-2})$ . При пересчете на площадь  $\pi r_1^{-2}$  эта составляющая становится значительно меньше фактической удельной силы, действующей на торец пуансона, равной  $P_0 / (\pi r_0^{-2})$ . В тоже время, концентрация напряжений в ступенчатом пуансоне при указанном в данном примере перепаде диаметров его рабочей части большая. Поэтому при общей величине силы закрытой прошивки заготовки ступенчатым пуансоном, близкой к величине силы для гладкого пуансона, вследствие большой удельной силы на торце и концентрации напряжений сопротивление ступенчатого пуансона усталости значительно меньше, чем у гладкого.

При проектировании матрицы с конической рабочей поверхностью угол ее конусности следует принимать наибольшим в рамках возможностей, предоставляемых допуском на наружный размер изделия. Надо учитывать, что конусности изготавливаемой детали и поверхности матрицы совпадают между собой только на уровне участка пуансона до ступени (рис. 3.20). При формировании стенки детали выше торца ступени пуансона конусность, образовавшаяся вследствие предшествующей осадки заготовки в конической матрице, уменьшается (см. рис. 3.20).



Рис. 3.27. Величины относительных удельных деформирующих сил при закрытой прошивке заготовок: слева – в плавающей матрице, справа – в матрице с конической рабочей поверхностью, α = 20

В результате разность наибольшего и наименьшего наружных диаметров изготавливаемой детали (величина допуска) равна разности наибольшего и наименьшего диаметров заготовки в промежуточный момент деформирования, когда заканчивается внедрение участка пуансона до ступени. Эта разность определяется углом конусности матрицы, высотой исходной заготовки и длиной участка пуансона о ступени. В каждом конкретном случае она может быть подсчитана. И, наоборот, в зависимости от допуска на наружный диаметр изготавливаемой детали может быть определен допускаемый угол конусности матрицы.

Особо отметим технологический процесс, в котором деталь, изготовленная закрытой прошивкой, подвергается последующей штамповке вытяжкой с утонением стенки. В этом процессе на этапе закрытой прошивки детали можно предусмотреть увеличенную конусность рабочей поверхности матрицы. Эта конусность будет устранена при последующей вытяжке.

В результате проведенного исследования зависимости величины силы закрытой прошивки заготовок от длины участка пуансона до ступени с использованием заготовок из алюминиевого сплава Д1 получены графики, приведенные на рис. 3.28 и 3.29.



Рис. 3.28. Изменение величины силы закрытой прошивки заготовки в цилиндрической плавающей матрице в зависимости от длины участка пуансона до ступени

Каждый график состоит из двух участков плавного изменения деформирующей силы, между которыми имеет место участок более резкого ее изменения. Анализ графиков совместно с макроструктурами изготовленных деталей (см. рис. 3.4, 3.6, 3.7) показал, что резкое изменение величины силы соответствует изменению характера течения металла. Характер течения меняется при такой длине пуансона до ступени, когда происходит слияние раздельных очагов пластической деформации под торцами пуансона и ступени в один общий очаг.

Изменение величины деформирующей силы на участках графиков левее критической длины связано с уменьшением объема общего очага пластической деформации.



Рис. 3.29. Изменение величины силы закрытой прошивки заготовок в конической матрице в зависимости от длины участка пуансона до ступени

## 3.3. Анализ напряжений в прошиваемой заготовке и в ступенчатом пуансоне

При проектировании технологического процесса определяют величину удельной силы закрытой прошивки ступенчатым пуансоном в зависимости от размеров изготавливаемого стакана, марки материала заготовки, условий контактного трения и оценивают сопротивление пуансонов усталости и экономическую целесообразность применения холодной закрытой прошивки.

Для построения аналитических зависимостей, описывающих величину удельной силы закрытой прошивки заготовок ступенчатым пуансоном, проведено изложенное ниже исследование. На рис. 3.30 показана расчетная схема закрытой прошивки заготовки с активно направленными напряжениями контактного трения между заготовкой и матрицей.



Рис. 3.30. Расчетная схема закрытой прошивки заготовки ступенчатым пуансоном

Матрица перемещается в направлении истечения металла со скоростью  $v_{\rm M}$ , превышающей скорость истечения  $v_{\rm ист}$ . В исследовании приняты относительные размеры. Все натуральные размеры отнесены к размеру торца пуансона. При этом диаметр матрицы обозначен *D*, диаметр торца пуансона – *d*, диаметр калибрующего пояска пуансона –  $d_1$ . Относительные размеры: R = D / d,  $r_1 = d_1 / d$ , r = d / d = 1. Все скорости течения частиц в деформируемой заготовке отнесены к скорости перемещения пуансона.

Деформируемая заготовка считается жесткопластической. В объеме заготовки имеют место два очага пластической деформации: под торцом пуансона (области *l* и *2*) и под ступенью (области *4* и *5*). Области пластической деформации разделены между собой жесткой областью *3*.

Анализ кинематического и напряженного состояний заготовки в областях l и 2 был рассмотрен в пункте 2.2. Отметим, что для описания кинематики течения в областях l и 2 ранее были использованы обозначения варьируемого параметра A и высоты очага пластической деформации под торцом пуансона h, а также обозначение удельной силы закрытой прошивки пуансоном без ступени q.

В связи с этим ниже при описании кинематики течения в областях 4 и 5 для аналогичных величин использованы обозначения  $A_1$  и  $h_1$ , а удельные силы прошивки: действующая на заготовку со стороны торца пуансона и действующая со стороны ступени – обозначены, соответственно, как  $q_0$  и  $q_1$ .

Очаг пластической деформации под ступенью – кольцевой, состоит из областей 4 и 5, отделенных друг от друга поверхностью  $\rho = r_1$ . В силу осевой симметрии схемы деформирования заготовки, скорость течения металла в окружном направлении  $v_{\theta} = 0$ . На схеме ось *z* совпадает с осью пуансона, ось  $\rho$  перпендикулярна оси *z*. Центр координат расположен в центре торца ступени пуансона. Скорости течения  $\vartheta_{\rho}$  и  $\vartheta_{z}$  отнесены к скорости перемещения пуансона.

С учетом граничных условий и характера течения, скорости течения частиц заготовки описаны следующими функциями (в которые входит варьируемый параметр  $A_1$ ):

$$\vartheta_{z4} = \frac{z}{h_1} (A_1 h_1 - A_1 z - 1), \ \vartheta_{z5} = -\frac{z}{h_1 (R^2 - r_1^2)} (A_1 h_1 - A_1 z - 1).$$
 (44)

Из условия постоянства объема определены

$$\vartheta_{\rho 4} = -\frac{\rho - 1}{2h_1} (A_1 h_1 - 2A_1 z - 1),$$
  

$$\vartheta_{\rho 5} = -\frac{R^2 - \rho^2}{2\rho h_1 (R^2 - r_1^2)} (A_1 h_1 - 2A_1 z - 1).$$
(45)

Скорости деформаций рассчитаны по уравнениям Коши. Интенсивность скоростей деформаций

$$\begin{split} \varepsilon_{i4} &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\frac{18 - 6\rho + 2}{4h_1^2 \rho^2}} (A_1 h_1 - 2A_1 z - 1)^2 + \frac{3}{2} A_1^2 \frac{(\rho - 1)^2}{h_1^2}},\\ \varepsilon_{i5} &= \frac{1}{3h_1 (R^2 - r_1^2)} \sqrt{\left(9 + \frac{R^4}{\rho^4} - \frac{R^4}{\rho^2} \ln\rho + R^4 \ln^2 \rho - 3 \frac{R^2}{\rho^2} - 3R^2 \ln\rho\right) \times \cdots} \rightarrow \\ &\sqrt{\rightarrow} \times (Ah - 2Az - 1)^2 + 3A^2 (\frac{R^4}{\rho^2} - 2R^2 + \rho^2). \end{split}$$

Согласно методу баланса мощностей отношение деформирующей силы к напряжению текучести материала заготовки  $\frac{P_{\pi}}{\sigma_s}$  с учетом того, что скорость перемещения пуансона принята равной 1, описано уже рассмотренным выше выражением (11).

В уравнении (11) использован закон контактного трения Э.Зибеля, согласно которому  $\tau_{\kappa} = \mu \sigma_{s}$ .

Для определения варьируемого параметра  $A_1$ , входящего в выражения для скоростей, проведено решение уравнения

$$(\partial/\partial A_1)(P_{\pi} / \sigma_s) = 0. \tag{46}$$

Вычисление слагаемых уравнения (11) и подстановка их в выражение (46), записанное в развернутом виде, позволили определить  $A_1$ . Развернутая запись аналитического выражения для  $A_1$  очень громоздка и здесь не приводится.

При дальнейшем классическом решении задачи громоздкое выражение для  $A_1$  следует подставить вместо обозначения  $A_1$  в формулы (44) и (45) и уже с таким видом этих формул, содержащих  $A_1$  в развернутом виде, произвести расчет по уравнениям Коши скоростей деформаций, а затем – интенсивности скоростей деформаций. Поскольку при применении уравнений Коши требуется дифференцирование формул для скоростей течения с параметром  $A_1$  в развернутом виде, реализовать это не представляется возможным.

С учетом характера кривых, построенных по аналитическому выражению для *A*<sub>1</sub>, была принята следующая модель этой зависимости:

$$A_{1M} = b_0 + b_{11}R^2 + b_1R + b_{22}h_1^2 + b_2h_1 + b_{33}\mu^2 + b_3\mu + b_{44}r_1^2 + b_4r_1 + b_{12}Rh_1 + b_{13}R\mu + b_{14}Rr_1.$$
(47)

Входящие в выражение (47) факторы R,  $r_1$  и  $h_1$  – размеры пуансона, отнесенные к диаметру его торца,  $\mu$  – фактор трения.

Для определения коэффициентов модели (47) проведен расчет величины *A*<sub>1</sub> по не приведённой здесь громоздкой аналитической формуле, способ выведения которой описан выше.

Принятые в расчете уровни варьирования факторов приведены в табл. 26, результаты расчета даны в табл. 27.

Табл. 26. Уровни варьирования факторов при расчете параметра А, по аналитической формуле

Фактор		R	<i>r</i> <sub>1</sub>	$h_1$	μ
Уровни в натуральном масштабе	$X_i$	1,7 2,1 2,5	1,2 1,4 1,6	0,3 0,5 0,7	0 0,2 0,4
Уровни в кодированном	x <sub>i</sub>	-1 0 1	-1 0 1	-1 0 1	-1 0 1
масштаое	Z	1 -2 1	1 -2 1	1 -2 1	1 -2 1

Формулы перехода от натуральных значений факторов к кодированным и обратно следующие:

$$x_{1} = 2,5 (R - 2,1); z_{1} = 3 (x_{1}^{2} - 2/3),$$

$$x_{2} = 5 (h_{1} - 0,5); z_{2} = 3 (x_{2}^{2} - 2/3),$$

$$x_{3} = 5 (\mu - 0,2); z_{3} = 3 (x_{3}^{2} - 2/3),$$

$$x_{4} = 5 (r_{1} - 1,4); z_{4} = 3 (x_{4}^{2} - 2/3).$$
(48)

После расчета коэффициентов по формуле (15) модель (47) в кодированном масштабе имеет вид:

$$A_{1M} = -0,114 - 0,0116 z_1 + 0,0564 x_1 + 0,0036 z_2 - 0,009 x_2 + 0,0038 z_3 - 0,002 x_3 - 0,0026 z_4 + 0,0105 x_4 + 0,01 x_1 x_2 + 0,021 x_1 x_3 + 0,0008 x_1 x_4.$$
(49)

В табл. 27 приведены использованные в расчете сочетания уровней факторов в кодированном масштабе и сравнение результатов расчета параметра  $A_1$  по не приведённой здесь аналитической формуле и  $A_{1M}$  – по математической модели (49).

После перехода к натуральным значениям факторов модель (46) имеет вид:

$$A_{1M} = -0,2175 R^{2} + 0,9255 R + 0,27 h_{1}^{2} - 0,5775 h_{1} + 0,285 \mu^{2} - 0,7652 \mu - 0,195 r_{1}^{2} + 0,5775 r_{1} + 0,125 R h_{1} + 0,2625 R \mu + 0,01 R r_{1} - 1,419.$$
(50)

В дальнейшем решении величина  $A_1$  оставлена временно в виде обозначения, без ее раскрытия.

После суммирования выражений, входящих почленно в уравнение (11) и деления обеих частей уравнения на площадь пуансона, получено громозд-кое выражение зависимости

$$q_1 / \sigma_s = f(R, r_1, h_1, \mu, A_1),$$
 (51)

где  $q_1 = P_{\Pi} / (\pi r_1^2)$ .

N⁰	<i>x</i> <sub>1</sub>	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>x</i> <sub>3</sub>	<i>x</i> <sub>4</sub>	$x_{1}x_{2}$	$x_{1}x_{3}$	$x_{1}x_{4}$				<i>Z</i> <sub>4</sub>	$A_1$	А <sub>1м</sub>
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-0,113	-0,127
2	0	-1	-1	-1	0	0	0	-2	1	1	1	-0,088	-0,068
3	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-0,066	-0,078
4	-1	0	-1	0	0	1	0	1	-2	1	-2	-0,139	-0,139
5	0	0	-1	0	0	0	0	-2	-2	1	-2	-0,096	-0,069
6	1	0	-1	0	0	-1	0	1	-2	1	-2	-0,066	-0,068
7	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	-0,124	-0,146
8	0	1	-1	1	0	0	0	-2	1	1	1	-0,076	-0,064
9	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-0,048	-0,053
10	-1	-1	0	0	1	0	0	1	1	-2	-2	-0,138	-0,162
11	0	-1	0	0	0	0	0	-2	1	-2	-2	-0,091	-0,081
12	1	-1	0	0	-1	0	0	1	1	-2	-2	-0,063	-0,069
13	-1	0	0	1	0	0	-1	1	-2	-2	1	-0,194	-0,189
14	0	0	0	1	0	0	0	-2	-2	-2	1	-0,088	-0,098
15	1	0	0	1	0	0	1	1	-2	-2	1	-0,055	-0,075
16	-1	1	0	-1	-1	0	1	1	1	-2	1	-0,238	-0,217
17	0	1	0	-1	0	0	0	-2	1	-2	1	-0,12	-0,117
18	1	1	0	-1	1	0	-1	1	1	-2	1	-0,08	-0,086

**Табл. 27.** Сочетания уровней факторов в кодированном масштабе и соответствующие им результаты расчета параметра  $A_1$  по аналитической формуле и по модели (49)

№	<i>x</i> <sub>1</sub>	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>x</i> <sub>3</sub>	<i>x</i> <sub>4</sub>	$x_{1}x_{2}$	$x_{1}x_{3}$	$x_{1}x_{4}$	<i>z</i> <sub>1</sub>		<i>Z</i> <sub>3</sub>	Z4	$A_1$	$A_{_{1\mathrm{M}}}$
19	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-0,204	-0,19
20	0	-1	1	1	0	0	0	-2	1	1	1	-0,095	-0,086
21	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-0,059	-0,053
22	-1	0	1	-1	0	-1	1	1	-2	1	1	-0,226	-0,238
23	0	0	1	-1	0	0	0	-2	-2	1	1	-0,12	-0,127
24	1	0	1	-1	0	1	-1	1	-2	1	1	-0,081	-0,086
25	-1	1	1	0	-1	-1	0	1	1	1	-2	-0,223	-0,229
26	0	1	1	0	0	0	0	-2	1	1	-2	-0,109	-0,107
27	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	-2	-0,065	-0,055

Окончание таблицы 27

В выражении (51) одно из слагаемых – это член, учитывающий силу трения по наружной поверхности очага пластической деформации:

$$\frac{\mu R h_1}{r_1^2 (R^2 - r_1^2)} - \frac{A_1 \mu R h_1^2}{3r_1^2 (R^2 - r_1^2)}.$$
(52)

В выражении (51), записанном в развернутом виде, это слагаемое присутствует со знаком «плюс», поскольку считается, что матрица неподвижна, и напряжения контактного трения между матрицей и заготовкой направлены противоположно течению.

Высота очага пластической деформации *h*<sub>1</sub> определяется из условия минимума энергии формоизменения (минимума мощности внешних сил) по следующему уравнению:

$$\partial q_1 / \partial h_1 = 0.$$

При этом требуется дифференцирование громоздкой зависимости (51), произвести которое не представляется возможным.

Для определения высоты очага пластической деформации  $h_1$  уравнение (51) заменено полиномом вида:

$$(q_{1}/\sigma_{s})_{M} = b_{0}' + b_{11}'R^{2} + b_{1}'R + b_{22}'h_{1}^{2} + b_{2}'h_{1} + b_{33}'\mu_{2} + b_{3}'\mu + b_{44}'r_{12} + b_{4}'r_{1} + b_{12}'Rh_{1} + b_{13}'R\mu + b_{14}'Rr_{1}.$$
(53)

Параметр  $A_1$  в модель (53) не входит, поскольку он однозначно связан с  $R, r_1, h_1$  и  $\mu$  формулой (51) и не может варьироваться независимо от них.

Для определения коэффициентов модели (53) проведен расчет величины  $q_1/\sigma_s$  по формуле (51). Приняты уровни варьирования факторов *R*,  $r_1 h_1$ ,  $\mu$ , приведенные выше в табл. 26. Формулы перехода от натуральных значений факторов к кодированным имеют вид (48).

После расчета коэффициентов по формуле (15) модель (53) в кодированном масштабе имеет вид:

$$(q_1/\sigma_s)_{\rm M} = 1,756 + 0,128z_1 + 0,169x_1 + 0,064z_2 - 0,136x_2 + 0,018z_3 + 0,032x_3 + 0,114z_4 - 0,058x_4 - 0,168x_1x_2 - 0,032x_1x_3 - 0,191x_1x_4.$$
(54)

В табл. 28 приведены принятые в расчете сочетания уровней факторов в кодированном масштабе и результаты расчета относительной удельной силы по формуле (51) –  $q_1/\sigma_s$  и по модели (54) –  $(q_1/\sigma_s)_{\rm M}$ . При расчете по формуле (51) параметр  $A_1$  рассчитывали по не приведенной здесь аналитической формуле.

После перехода к натуральным значениям факторов модель (54) имеет вид:

$$(q_1/\sigma_s)_{M} = 19,84 + 2,4 R^2 - 5,19 R + 8,55r_1^2 - 19,22r_1 + 3,45h_1^2 + 0,28h_1 + 1,35\mu^2 + 0,46\mu - 2,39Rr_1 - 2,1Rh - 0,4R\mu.$$
(55)

Зависимость высоты очага пластической деформации от размеров инструмента, определенная из условия минимума мощности внешних сил, следующая:

$$h_1 = 0,304R + 0,04. \tag{56}$$

Путем подстановки (56) в (55) получено, при условии, что зависимость (55) записана для закрытой прошивки в неподвижной матрице:

$$(q_1/\sigma_s)_{\rm M} = 19,85 + 2,08 R^2 - 5,105 R + 8,55 r_1^2 - 19,22r_1 - 2,39Rr_1 + 1,35\mu^2 + 0,46\mu - 0,4R\mu.$$
(57)

**Табл. 28.** Сочетания уровней факторов в кодированном масштабе и результаты расчета относительной удельной силы на торце ступени пуансона по формуле  $(51) - q_1/\sigma_s$  и по модели  $(54) - (q_1/\sigma_s)_{M}$ 

Nº	<i>x</i> <sub>1</sub>	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>x</i> <sub>3</sub>	<i>x</i> <sub>4</sub>	$x_{1} x_{2}$	$x_{1} x_{3}$	$x_{1} x_{4}$	<i>z</i> <sub>1</sub>	<i>Z</i> <sub>2</sub>	<i>z</i> <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	$q_1/\sigma_s$	$(q_1/\sigma_s)_{M}$
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1,57	1,664
2	0	-1	-1	-1	0	0	0	-2	1	1	1	1,99	1,84
3	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	2,69	2,784
4	-1	0	-1	0	0	1	0	1	-2	1	-2	1,33	1,35
5	0	0	-1	0	0	0	0	-2	-2	1	-2	1,38	1,166
6	1	0	-1	0	0	-1	0	1	-2	1	-2	1,76	1,751
7	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1,94	1,994
8	0	1	-1	1	0	0	0	-2	1	1	1	1,32	1,452
9	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1,64	1,678

Nº	<i>x</i> <sub>1</sub>	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>x</i> <sub>3</sub>	<i>x</i> <sub>4</sub>	$x_{1} x_{2}$	$x_{1} x_{3}$	$x_{1} x_{4}$	$Z_1$	$Z_2$	<i>Z</i> <sub>3</sub>	$Z_4$	$q_1/\sigma_s$	$(q_1/\sigma_s)_{M}$
10	-1	-1	0	0	1	0	0	1	1	-2	-2	1,41	1,465
11	0	-1	0	0	0	0	0	-2	1	-2	-2	1,62	1,418
12	1	-1	0	0	-1	0	0	1	1	-2	-2	2,16	2,139
13	-1	0	0	1	0	0	-1	1	-2	-2	1	2,0	1,834
14	0	0	0	1	0	0	0	-2	-2	-2	1	1,41	1,428
15	1	0	0	1	0	0	1	1	-2	-2	1	1,8	1,69
16	-1	1	0	-1	-1	0	1	1	1	-2	1	1,6	1,738
17	0	1	0	-1	0	0	0	-2	1	-2	1	1,62	1,818
18	1	1	0	-1	1	0	-1	1	1	-2	1	1,97	2,122
19	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1,96	2,058
20	0	-1	1	1	0	0	0	-2	1	1	1	1,68	1,788
21	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	2,22	2,286
22	-1	0	1	-1	0	-1	1	1	-2	1	1	1,63	1,686
23	0	0	1	-1	0	0	0	-2	-2	1	1	1,75	1,63
24	1	0	1	-1	0	1	-1	1	-2	1	1	2,19	2,372
25	-1	1	1	0	-1	-1	0	1	1	1	-2	1,61	1,647
26	0	1	1	0	0	0	0	-2	1	1	-2	1,5	1,232
27	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	-2	1,66	1,585

Окончание таблицы 28

Путем подстановки (56) в (50) получено:

$$A_{1M} = -0,155 R^{2} + 0,762R + 0,285 \mu^{2} - 0,7652 \mu - 0,195r_{1}^{2} + 0,5775 r_{1} + 0,2625 R \mu + 0,01 R r_{1} - 1,442.$$
(58)

При закрытой прошивке с активно направленными напряжениями контактного трения из значения удельной силы, рассчитанного по модели (57), вычитают удвоенное слагаемое (52), характеризующее силу трения на наружной поверхности очага пластической деформации.

В результате получается:

$$(q_{1a}/\sigma_s)_{M} = 19,85 + 2,08 R^2 - 5,105 R + 8,55 r_1^2 - 19,22r_1 - 2,39Rr_1 + + 1,35\mu^2 + 0,46\mu - 0,4R\mu - - \frac{2\mu Rh_1}{r_1^2(R^2 - r_1^2)} + \frac{2A_1\mu Rh_1^2}{3r_1^2(R^2 - r_1^2)} .$$
(59)

С учетом (56) и (58) выражение (59) принимает вид:

$$(q_{1a}/\sigma_{s})_{M} = 19,85 + 2,08 R^{2} - 5,105 R + 8,55 r_{1}^{2} - 19,22r_{1} - 2,39Rr_{1} + 1,35\mu^{2} + 0,46\mu - 0,4R\mu - \frac{2\mu R(0,304R + 0,04)}{r_{1}^{2}(R^{2} - r_{1}^{2})} + \frac{2\mu R(0,304R + 0,04)^{2}(-0,155 R^{2} + 0,762R + 0,285 \mu^{2}}{3r_{1}^{2}(R^{2} - r_{1}^{2})} \dots \rightarrow (60)$$

$$\rightarrow \frac{-0,7652 \mu - 0,195r_{1}^{2} + 0,5775 r_{1} + 0,2625 R\mu + 0,01 R r_{1} - 1,442)}{3r_{1}^{2}(R^{2} - r_{1}^{2})}.$$

Удельная сила (осевое среднее напряжение) закрытой прошивки ступенчатым пуансоном складывается из силы на торце пуансона и силы на ступени:

$$q = q_0' / r_1^2 + q_1, (61)$$

где  $q_0'$  – удельная сила на торце пуансона,  $q_1$  – удельная сила на ступени пуансона, определяемая по (60) при закрытой прошивке с активно направленными напряжениями контактного трения и определяемая по (57) при закрытой прошивке в неподвижной матрице.

Силами трения заготовки о пуансон и матрицу в области 3 (см. рис. 3.30) авторы монографии пренебрегли, учитывая небольшую высоту этой области у деталей, закрытая прошивка которых может быть осуществлена ступенчатым пуансоном, и более низкие величины радиальных напряжений на инструмент в этой области, по сравнению с областями 2 и 4.

Замечание о высоте области связано с тем, что длина участка пуансона до ступени не может превышать глубину полости, которую можно прошить до разрыва смазочного слоя на боковой поверхности пуансона. Эта глубина по опыту авторов не превышает 2 ... 2,5 диаметра участка пуансона до ступени. При начале внедрения ступени новая порция смазочного материала перемещается с торца заготовки на поверхность прошиваемой полости стакана, и разрыва смазочного слоя в полости не происходит.

Величина  $q_0'$  после начала внедрения ступени определяется из выражения:

$$q_{0}' = q_{0} + \sigma_{z0}, \tag{62}$$

где  $q_0$  – удельная сила закрытой прошивки заготовки торцевой частью пуансона без учета влияния ступени,  $\sigma_{x0}$  – напряжение на верхней границе области 2, определяемое как сила на ступени, деленная на площадь кольцевого зазора между боковыми поверхностями полости матрицы и участка пуансона до ступени:

$$\sigma_{z0} = q_1 r_1^2 / (R^2 - 1). \tag{63}$$

Удельная сила закрытой прошивки  $q_0$  определяется по уравнению (24), полученному авторами монографии при анализе кинематического и напря-

женного состояний заготовки в областях 1 и 2 (см. рис. 2.3) в неподвижной матрице. При активно направленных напряжениях контактного трения – по выражению (26).

После подстановки (63) в (62) и (62) в (61) получено:

$$q = q_0 / r_1^2 + q_1 R^2 / (R - 1).$$
(64)

Графики, построенные по формулам (57), (59), (61), с использованием (24), (26) и (63), приведены на рис. 3.31 и 3.32. Графики построены при коэффициенте контактного трения  $\mu_c = 0,2$ .

Заметим, что с позиций технологии XOШ: отсутствия следов контакта на поверхностях штампованной поковки и матрицы, значительное снижение требования к качеству смазывания заготовки при закрытой прошивке заготовок с активно направленными напряжениями трения нецелесообразно, поэтому рациональным является значение  $\mu = 0,2$ .



**Рис. 3.31.** Удельная сила на ступени пуансона: кривые *1* при *R* =1,5; кривые *2* – при *R* = 2; кривые *3* – при *R* =2,5. Сплошные кривые – в неподвижной матрице, штриховые – при активно направленных напряжениях контактного трения

Большая величина удельной силы на участке пуансона ниже ступени (см. рис. 3.32) связана с взаимодействием потоков материала деформируемой заготовки из-под торца пуансона вверх и от ступени вниз. Это взаимодействие оценивается величиной  $\sigma z_0$ , определяемой по формуле (63).

Сопоставление рис. 2.4 и 3.32 показывает, что при внедрении ступени удельная сила на торце пуансона существенно возрастает. Кроме того, на величину интенсивности напряжений в участке пуансона до ступени влияет концентрация напряжений в галтели под ступенью. При этом в галтели имеют место как геометрическая, так и силовая концентрация напряжений.



**Рис. 3.32.** Удельная сила на торце пуансона: кривые *1* при *R* =1,5; кривые *2* – при *R* =2; кривые *3* – при *R* =2,5. Сплошные кривые – в неподвижной матрице, штриховые – при активно направленных напряжениях контактного трения

### 3.4. Оценка сопротивления ступенчатого пуансона усталости

На рис. 3.33 показана система сил, действующих на пуансон: p – удельная сила в пуансоне, создаваемая ползуном пресса,  $q'_0$  – среднее осевое напряжение на торце пуансона,  $p_z$  – осевое давление на галтель под ступенью,  $p_\rho$  – радиальное давление на галтель. Согласно принципу суперпозиции, можно последовательно рассмотреть влияние среднего осевого напряжения  $q'_0$  и давлений  $p_z$  и  $p_o$ .

При действии  $q_0'$  интенсивность напряжений определяется по формуле:

$$2\sigma_i^2 = (\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_\rho)^2 + (\sigma_\rho - \sigma_z)^2 + 6\tau.$$
(65)

При наложении давлений *p*<sub>z</sub> и *p*<sub>ρ</sub> компоненты тензора напряжений опасной точки галтели изменяются следующим образом:

$$\sigma_{z}' = \sigma_{z} + p_{z}; \ \sigma_{\theta}' = \sigma_{\theta} + p_{\rho}; \ \sigma_{\rho}' + p_{\rho}; \ \tau' = \tau.$$
(66)

Согласно принципу Сен-Венана такое предположение допустимо. С изменением составляющих тензора напряжений изменяется величина интенсивности напряжений.

Подстановка новых значений (66) в (65) дает:

$$(\sigma_{i}')^{2} = (p_{z} - p_{\rho}) + (pz - p_{\rho})(2\sigma_{z} - \sigma_{\theta} - \sigma_{\rho}) + \sigma_{i}^{2}.$$
 (67)



Рис. 3.33. Удельные силы и давления, действующие на галтель ступенчатого пуансона при закрытой прошивке

Для использования формулы (67) в практических расчетах необходимо оценить величины  $\sigma_i, \sigma_\rho, \sigma_\theta, \sigma_z$ . Отсутствие сведений в справочной литературе о распределении напряжений в ступенчатых валах при их сжатии заставляет воспользоваться данными о распределении напряжений в выточках. Из предположения, что характер распределения нормальных напряжений в обоих случаях идентичен, получено для опасной точки галтели:

$$\sigma_{z} = \alpha_{\sigma}q_{0}'; \ \sigma_{i} = 0.9\sigma_{z} = 0.9\alpha_{\sigma}q_{0}'; \ \sigma_{\theta} = (0.3 \ \dots \ 0.4)\sigma_{z}; \ \sigma_{\rho} = 0,$$

откуда

$$(\sigma_i')^2 = 0.8\alpha_{\sigma}^2(q_0')^2 + 1.7\alpha_{\sigma}q_0'(p_z - p_{\rho}) + (p_z - p_{\rho})^2,$$

где а $\sigma$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений; разность величин  $p_z - p_o$  зависит от формы галтели.

Согласно условию пластичности,  $(p_z - p_p)_{max} = 1,15\sigma_s \approx \sigma_s$ , где  $\sigma_s$  – напряжение текучести деформируемого материала. Следовательно,

$$\sigma_i' = \sqrt{0.8\alpha_\sigma^2 (q_0')^2 + 1.7\alpha_\sigma q_0' + 1.}$$
(68)

На основании выражений (62) и (68) построена приведенная на рис. 3.34 номограмма.

По графикам в правой части номограммы в зависимости от относительных радиусов пуансона и матрицы определяют величину удельной силы, действующей на торец пуансона. По графикам в левой части номограммы, в зависимости от удельной силы на торце пуансона и теоретического коэффициента концентрации напряжений в галтели пуансона, устанавливают величину интенсивности напряжений в показанном на рис. 3.33 волнистой линией его опасном сечении.



**Рис. 3.34.** Номограмма для определения интенсивности напряжений в галтели ступенчатого пуансона: *I* – при *R* = 1,5; 2 – при *R* = 2; 3 – при *R* = 2,5; сплошные кривые – в неподвижной матрице, штриховые – при активно направленных напряжениях контактного трения

Знание величины интенсивности напряжений позволяет по диаграмме сопротивления усталости для гладких пуансонов, показанной на рис. 1.2, оценить стойкость ступенчатого пуансона.

Приведенные выше зависимости использованы при решении конкретной задачи по оценке увеличения сопротивления пуансона усталости при ХОШ закрытой прошивкой детали типа стакан из алюминиевого сплава, имеющей размеры D = 40 мм; d = 22 мм,  $d_1 = 28$  мм. Заданному чертежом детали радиусу галтели под ступенью соответствует теоретический коэффициент концентрации напряжений  $\alpha_{r} = 1,5$ .

В техническом задании предоставлена возможность выбора одного из трех алюминиевых сплавов, для которых кривые упрочнения (диаграммы истинных напряжений) приведены на рис. 3.26 [1]. При этом сопротивление пуансона усталости должно быть обеспечено из условия изготовления одним пуансоном не менее 3000 деталей. Предпочтение при возможности удовлетворения последнему условию следует отдать наиболее прочному алюминиевому сплаву.

Решение задачи осуществляется следующим образом.

При заданных размерах детали R = 1,82;  $r_1 = 1,27$ . Применяемая смазка – технический животный жир, обеспечивает коэффициент контактного трения  $\mu_s = 0,2$ . По графику на рис. 3.34 определено, что  $q_0'/\sigma_s = 4,4$  при закрытой прошивке в неподвижной матрице и  $q_0'/\sigma_s = 4$  при прошивке с активно направленными напряжениями контактного трения.

Для определения напряжения текучести материала заготовки  $\sigma_s$  по графикам на рис. 3.26 требуется знание величины степени деформации. Эта величина, определенная для опасного сечения пуансона, показанного на рис. 3.33, по методике из справочника [1] составляет  $e \approx 1,2$ . Тогда, для наиболее прочного из трех приведенных на рисунке сплава 3,  $\sigma_c$  равно 350 МПа.

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

По номограмме на рис. 3.34 определено, что при закрытой прошивке в неподвижной матрице  $\sigma_i = 7\sigma_s$ , что составляет 2450 МПа. Рассчитанная величина интенсивности напряжений приравнена к величине q для гладкого пуансона, и по кривой на рис. 1.2 оценено, что сопротивление пуансона усталости  $N \approx 1000$  циклов штамповки, что неудовлетворительно. При закрытой прошивке с активно направленными напряжениями контактного рения  $\sigma_i = 6, 4\sigma_s$ , что составляет 2240 МПа. При этом сопротивление пуансона усталости, оцененное по кривой на рис. 7,  $N \approx 1700$  циклов штамповки. Однако и это не удовлетворяет требованию задания.

При изготовлении детали из сплава 2, обладающего меньшей прочностью,  $\sigma_s$  равно 300 МПа. Тогда при закрытой прошивке в неподвижной матрице  $\sigma_i = 2100$  МПа. По кривой на рис. 1.2 сопротивление пуансона усталости  $N \approx 2100$ , что меньше, чем требуется в задании. При прошивке с активно направленными напряжениями контактного трения  $\sigma_i = 1920$  МПа. При этом оцененное по кривой на рис. 2.1 сопротивление пуансона усталости  $N \approx 3000$  циклов.

Таким образом, деталь следует изготавливать закрытой прошивкой из сплава Амг2М при создании активно направленных напряжений контактного трения. При невозможности создания активно направленных напряжений контактного трения деталь, при обеспечении сопротивления пуансона усталости, равного 3000 деталей, можно изготавливать только из сплава АД1.

Если оценить эффект от применения активно направленных напряжений контактного трения по всей высоте заготовки, то повышение благодаря их реализации сопротивления усталости прошивающего полость заготовки пуансона будет больше, чем установленное выше.

# 3.5. Исследование зависимости силы закрытой прошивки заготовок от размеров пуансона с учетом радиуса галтели под ступенью

В описанном ниже экспериментальном исследовании принято, что сила закрытой прошивки заготовки ступенчатым пуансоном зависит от четырех факторов: относительного радиуса матрицы R, относительного радиуса ступени пуансона  $r_1$ , относительного радиуса галтели  $r_2$ , относительной длины участка пуансона до ступени l, см. рис. 3.35.

Для выявления влияния каждого фактора в эксперименте придавали ему 5 различных значений. Если строить однофакторный эксперимент по классическому плану, когда каждый фактор принимает 5 различных значений при неизменных значениях остальных трех факторов, число комбинаций составит 625. Потребуется 625 комплектов инструмента.

При принятом плане эксперимента в виде представленного на рис. 3.36 комбинационного квадрата [26], где малыми клетками отмечены исследо-

ванные сочетания факторов, количество комплектов инструмента и опытов сокращается в 25 раз. Применение приведенного на рис. 3.36 комбинационного квадрата является развитием метода греко-латинских квадратов.



Рис. 3.35. Принятые обозначения размеров ступенчатого пуансона:

$R = \frac{\overline{R}}{\overline{R}}$	$r = \frac{\overline{r_1}}{r_1}$	$-\overline{r}_2$	_ l
$\overline{r}_0$ ;	$r_1 - \frac{1}{\bar{r}_0}; r_2$	$-\overline{\overline{r_0}}; i$	$\overline{r}_0$

$r_1$		1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	
R	2 2	0 0,6 1,2 1,8 2,4	0 0,6 1,2 1,8 2,4	0 0,6 1,2 1,8 2,4	0 0,6 1,2 1,8 2,4	0 0,6 1,2 1,8 2,4	
1,7	0,8 1,2 1,5	4,12	3,7 3,72	4,06	3,6 <i>3,49</i>	4,38	
	2 2,4	1,73%	0,54%	4 1,5%	3,06%	0,45% 4,4	
1,9	0,8 1,2	3,96 4,12		3,61 3,61	3,61 4,05		
	2 2,4	4,1 3,41%	0,72%	3,14%	1,25% [4]	2,35%	
2,2	0,8 1,2	3 <u>,75</u> 3,78	3,84	3,92	3,62 3,53	3,61 [3,6]	
	2 2,4	0,8 %	3,9 1,54%	2%	1,97%	0,28%	
2,5	0,8 1,2	4,04	3,4 3,46	3,83 <u>3,9</u>	3,57	3,87	
	2	0,25% 4,05	1,75%	1,79%	0,83%	3,2% <u>3,7</u> 5	
3	0,8	4 3,86	4,37	3,84	4,28	<u>3.3</u> 3,42	
	1,6 2 2,4	3,5%	0,68% 4,4	4%	1,9% <del>4,</del> 2	3,64%	

Рис. 3.36. Комбинационный квадрат с указанием значений факторов в каждом из опытов, а также – результатов опытов

В примененном экспериментальном инструменте (см. рис. 3.35) диаметр матрицы равнялся 20 мм, заготовка в матрице опиралась на нижний пуансон, и матрица была освобождена от крепления вдоль своей оси. Под действием напряжений трения на контакте с заготовкой матрица поднималась вслед за вытекающим из-под пуансона деформируемым сплавом. Это позволило уменьшить силу закрытой прошивки.

Деформирование заготовок проводили на гидравлической испытательной машине марки Инстрон. Каждый из опытов был проведен дважды: на заготовках из алюминиевого сплава Д1 и заготовках из меди М1. Диаметр заготовок равнялся 20 мм, их высота равнялась 25 мм. Скорость деформирования составляла 5 мм/мин. Технологическим смазочным материалом служило пушечное сало. Форма графика изменения силы по ходу холодной закрытой прошивки заготовки представлена на рис. 3.37.



Рис. 3.37. График изменения силы по ходу внедрения ступенчатого пуансона в заготовку

На этом графике, так же, как и ранее (см. стр. 115), для сопоставления результатов разных опытов, за силу закрытой прошивки ступенчатым пуансоном было принято значение, соответствующее началу внедрения ступени и отмеченное на рис. 3.37 кружком. Считали, что дальнейший рост силы вызван упрочнением металла заготовки. Таким образом, при закрытой прошивке заготовок из упрочняющихся сплавов, полученная путем описываемого эксперимента формула дает верный результат при небольшой глубине полости на ее участке выше ступени. При закрытой прошивке заготовок из не упрочняющихся сплавов формула применима при любой глубине полости.

Удельная сила закрытой прошивки заготовок q равна измеренной в опытах силе закрытой прошивки P, деленной на площадь торца ступени пуансона  $\pi r_1^2$ . Экспериментально определенные величины удельных сил закрытой прошивки q приведены на рис. 3.38, на графиках вверху. На этом же рисунке, на графиках внизу, приведены значения относительных удельных сил закрытой прошивки  $q/\sigma_s$ . Величины напряжения текучести  $\sigma_s$  были определены по кривым упрочнения материалов заготовок.



Рис. 3.38. Экспериментально определенные удельные силы прошивки: • – сплав Д1; • – медь М1;  $a - r_1 = 1,1; \ \delta - r_1 = 1,2; \ e - r_1 = 1,3; \ e - r_1 = 1,4; \ \partial - r_1 = 1,5$ 

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Для сплава Д1 кривая упрочения была приведена выше, на рис. 3.26. Для построения кривой упрочнения для сплава М1 проводили поэтапную осадку двух образцов диаметром 15 мм и высотой 16 и 18 мм. Перед каждым этапом осадки на торцы заготовок наносили смазочный материал, что позволило практически полностью исключить образование бочки на осаживаемой заготовке, т.е. свести к минимуму трение между заготовкой и инструментом. Степени деформации при закрытой прошивке ступенчатыми пуансонами определяли по методике, описанной в работе [1].

На рис. 3.38 видно, что величины относительной удельной силы закрытой прошивки одним и тем же пуансоном заготовок из алюминиевого сплава и меди незначительно различаются между собой. Различие может быть объяснено неодинаковым трением между этими материалами и инструментом и неточностью построения кривых упрочнения этих материалов. За истинные значения величин относительных удельных сил были приняты средние между значениями, полученными при экспериментах на двух исследованных материалах. Эти средние значения записаны в соответствующих малых клетках комбинационного квадрата на рис. 3.36.

При обработке экспериментальных данных по каждой строке и столбцу комбинационного квадрата подсчитали среднее арифметическое результатов. Таким путем влияние трех факторов усреднили и выявили влияние четвертого. Операции усреднения и полученные описанным образом данные приведены в табл. 29 и 30.

	$r_1$								
R	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	Сумма по строке	Среднее по строке		
1,7	4,05	3,7	4,0	3,6	4,4	19,75	3,95		
1,9	4,1	4,15	3,5	4,0	3,4	19,15	3,83		
2,2	3,75	3,9	4,0	3,55	3,6	18,8	3,76		
2,5	4,05	3,4	3,9	3,6	3,75	18,7	3,74		
3,0	4,0	4,4	4,0	4,2	3,3	19,9	3,98		
Сумма по столбцу	19,95	19,55	19,4	18,95	18,45	96,3	_		
Среднее по столбцу	3,99	3,91	3,88	3,79	3,69	_	3,852		

**Табл. 29.** Результаты  $q/\sigma_s$  в зависимости от относительного радиуса матрицы *R* и относительного радиуса ступени пуансона  $r_1$ 

	r <sub>1</sub>								
l	0	0,6	1,2	1,8	2,4	Сумма по строке	Среднее по строке		
0,8	3,3	3,6	3,4	3,5	3,75	17,55	3,51		
1,2	3,7	3,4	4,0	3,55	3,9	18,55	3,71		
1,6	3,6	4,0	3,6	4,05	4,15	19,4	3,88		
2,0	4,1	3,9	4,0	3,75	4,2	19,95	3,99		
2,4	4,0	4,05	4,0	4,4	4,4	20,85	4,17		
Сумма по столбцу	13,7	18,95	19,0	19,25	20,4	96,3	_		
Среднее по столбцу	3,74	3,79	3,8	3,85	4,08	_	3,852		

**Табл. 30.** Результаты  $q/\sigma_s$  в зависимости от относительной длины пуансона до ступени l и относительного радиуса галтели пуансона  $r_2$ 

По усредненным данным построены графики (рис. 3.39). Графики показывают, что зависимости  $q/\sigma_s$  от  $r_1$  и l являются линейными, зависимости  $q/\sigma_s$  от R и  $r_2$  имеют более высокую степень. График  $q/\sigma_s = f(R)$  по форме близок к алогичному графику при закрытой прошивке гладкими пуансонами. Характер изменения  $q/\sigma_s = f(r_2)$  объясняется ростом по мере увеличения  $r_2$ объема очага пластической деформации, а также силы контактного трения ввиду повышения давления на стенку матрицы.

Из четырех факторов на относительную удельную силу закрытой прошивки наиболее влияет  $r_1$ . При возрастании  $r_1$  на 0,1 величина  $q/\sigma_s$  увеличивается на 0,0375. Сказанное относится к влиянию фактора в среднем в пределах принятого диапазона его изменения. Однако при изменении R от 1,9 до 1,7 величина  $q/\sigma_s$  изменяется на 0,19. Следовательно, на этом участке наиболее сильным по влиянию является фактор R.

Для построения математической модели, описывающей выявленные влияния, была проведена описанная ниже обработка графических зависимостей.

Для нейтрализации влияния факторов  $r_1$  и l все данные были пересчитаны на значения  $r_1 = 1$  и l = 0. Например, число 4, стоящее в центральной большой клетке комбинационного квадрата и относящееся к величинам  $r_1 = 1,3$  и l = 2,4, было уменьшено на  $[(1,3-1)/0,1] \ge 0,0375 = 0,9$  и увеличено на  $[(1,3-1)/0,1] \ge 0,05 = 0,15$ , после чего оно стало равным 3,25. Число 4,05, стоящее в первой большой клетке верхнего ряда и относящееся к r1 = 1,1 и l = 1,6, было уменьшено на  $[(1,6-0)/0,1] \ge 0,0375$ , увеличено на  $[(1,1-1)/0,1] \ge 0,05$  и стало равным 3,5.

В соответствии с этим пересчетом в аналитическую формулу, которой будет описано влияние факторов, входят слагаемые  $0,375 \ l - 0,5 \ (r_1 - 1)$ .



Рис. 3.39. Графики зависимостей относительной удельной силы закрытой прошивки от рассматриваемых факторов

После перечета указанным выше способом результаты, сгруппированные в зависимости от R и  $r_2$ , приведены в табл. 31 (цифры без скобок).

Изменение в зависимости от R усредненных по  $r_2$  результатов (крайний правый столбец табл. 31) достаточно точно описывается формулой  $0.5(R - 2.35)^2$ . Для нейтрализации влияния R каждое значение  $q/\sigma_s$  было уменьшено на величину, подсчитанную по этой формуле. Характер изменения в зависимости от  $r_2$  усредненных по R результатов (нижняя строка табл. 31) позволил установить, что для нейтрализации фактора  $r_2$  необходимо вычесть из каждого значения  $q/\sigma_s$  величину, подсчитанную по отосчитанную по формуле (0.25  $r_2$ )<sup>2</sup>.

Нейтрализуя по найденным зависимостям влияние всех четырех факторов на экспериментальные данные, получили значения, записанные в табл. 31 в скобках. Эти значения значительно меньше различаются между собой, чем указанные в малых клетках комбинационного квадрата на рис. 3.36. Их среднее арифметическое равно 3,16.

Окончательный вид искомой формулы математической модели

$$q/\sigma_s = 0.5(R - 2.35)^2 - 0.5(r_1 - l) + (0.25r_2)^2 + 0.375l + 3.16.$$
(69)

Рассчитанные по формуле (69) значения относительных удельных сил закрытой прошивки, для примененных в эксперименте пуансонов, приведены в больших клетках комбинационного квадрата на рис. 3.36. Там же в процентах указаны расхождения расчетных и экспериментальных данных. Наибольшее их расхождение между собой равно 4%.

	r <sub>2</sub>								
R	0	0,6	1,2	1,8	2,4	Сумма по строке	Среднее по строке		
1,7	3,35	3,5	3,4	3,5	3,75	17,5	3,5		
	(3,14)	(3,27)	(3,1)	(3,09)	(3,18)	(15,78)	(3,156)		
1,9	3,4	3,2	3,3	3,35	3,65	16,9	3,38		
	(3,3)	(3,08)	(3,11)	(3,05)	(3,19)	(15,73)	(3,146)		
2,2	3,25	3,25	3,25	3,3	3,5	16,55	3,31		
	(3,24)	(3,22)	(3,15)	(3,09)	(3,13)	(15,83)	(3,166)		
2,5	3,2	3,2	3,2	3,25	3,6	16,45	3,29		
	(3,19)	(3,17)	(3,1)	(3,04)	(3,23)	(15,37)	(3,146)		
3,0	3,25	3,55	3,6	3,6	3,65	17,65	3,53		
	(3,04)	(3,32)	(3,3)	(3,19)	(3,08)	(15,93)	(3,186)		
Сумма	16,45	16,7	16,75	17	18,15	85,05	_		
по столбцу	(15,91)	(16,06)	(15,76)	(15,46)	(15,81)	(79)			
Среднее	3,29	3,34	3,35	3,4	3,63	_	3,402		
по столбцу	(3,182)	(3,212)	(3,152)	(3,092)	(3,162)		(3,16		

Табл. 31. Результаты промежуточных расчетов для определения свободного члена математической модели

Если применить полученную математическую модель к оценке относительной удельной силы прошивки пуансоном с цилиндрической боковой поверхностью, не имеющей ступеней, то останутся только следующие члены модели:

$$q'/\sigma_s = 0.5(R - 2.35)^2 + 3.16.$$
 (70)

В соответствии с формулой (70), при R = 2,35 сила минимальна, и этот минимум равен 3,16. Такие значения типичны для закрытой прошивки пуансонами, имеющими боковую поверхность без ступени (см. рис. 2.4).

## 3.6. Холодная объемная штамповка вставок бандажированных матриц

ХОШ нашла применение в инструментальном производстве. В справочнике [1] описаны несколько способов деформирования заготовок из штамповых сталей, применяемых на предприятиях. Наряду с этим существуют способы, ранее не отраженные в литературе. Рассмотренный ниже способ применяется при холодной штамповке вставок бандажированных матриц с полостями переменного сечения (рис. 3.40).

Как показано выше, эквивалентное напряжение в галтели ступенчатого пуансона превышает удельную силу, действующую на его торец, в 1,5 ... 2 раза. Как следствие, при холодной закрытой прошивке по традиционным схемам полостей переменного сечения у вставок матриц из инструментальных сталей пуансон разрушается в своей рабочей части.

Согласно разработанному авторами данной монографии способу, при закрытой прошивке участка полости частью ступенчатого пуансона, имеющей поперечное сечение большего диаметра, торец пуансона осуществляет только вырубку перемычки и калибровку участка полости меньшего диаметра.



**Рис. 3.40.** Схема штампа для изготовления закрытой прошивкой вставок бандажированных матриц, имеющих ступенчатую полость

При работе показанного на рис. 3.40 штампа заготовка находится в матрице и опирается на закаленный выталкиватель. Нижний пуансон имеет
диаметр, который на 0,1 ... 0,2 мм меньше диаметра торцового участка верхнего пуансона. При прошивке заготовки торцовым участком верхнего пуансона одновременно происходит встречная ее закрытая прошивка нижним пуансоном. Чтобы на нижнем пуансоне была создана необходимая для прошивки сила, он опирается через закаленную плиту на пакет тарельчатых пружин, способный создать требуемую силу.

Встречное внедрение в заготовку верхнего и нижнего пуансонов продолжается до достижения толщины перемычки в полости заготовки, равной 0,5 диаметра торцового участка верхнего пуансона. В момент достижения указанной толщины перемычки прочные толкатели, установленные в верхней плите штампа, упираются в плиту, на которой установлен нижний пуансон, и начинают опускать ее, преодолевая сопротивление тарельчатых пружин. Одновременно опускается нижний пуансон. Рабочая часть верхнего пуансона, имеющая больший диаметр, осуществляет закрытую прошивку в заготовке участка полости большего диаметра, а торец верхнего пуансона вырубает перемычку и калибрует в заготовке полость, прошитую ранее нижним пуансоном.

Перемещение верхнего пуансона происходит до достижения его тором уровня нижней кромки полости штампуемой вставки матрицы (далее просто вставки). При этом перемычка опускается в полость выталкивателя штампа. При возвратном ходе верхнего пуансона под действием тарельчатых пружин перемычка возвращается в полость вставки. В связи с тем, что полость вставки при калибровке увеличилась на 0,1 ... 0,2 мм, после извлечения вставки из штампа перемычка легко удаляется из ее полости.

Сила, действующая на торец верхнего пуансона при выполнении им вырубки, в 3 ... 4 раза меньше, чем сила на торце верхнего пуансона, которая имела бы место при выполнении им не вырубки перемычки, а закрытой прошивки полости вставки. Поэтому эквивалентное напряжение в галтели верхнего пуансона не превышает величину удельной силы, действовавшей на этапе выполнения закрытой прошивки заготовки торцевым участком верхнего пуансона, до начала внедрения в заготовку ступени этого пуансона. Сопротивление разрушению ступенчатого пуансона при закрытой прошивке по описанному способу не ниже сопротивления разрушению пуансона с постоянным вдоль его оси диаметром рабочей части, осуществляющего закрытую прошивку заготовки.

На рис. 3.41 приведены графики изменения сил по ходу закрытой прошивки заготовки из стали 20 традиционным и разработанным авторами данной монографии способами. Выбор стали 20 для проведения сравнительного эксперимента объясняется тем, что осуществить прошивку заготовки из легированной стали традиционным способом не представляется возможным из-за поломки пуансона. Приведенные на рис. 3.41 графики подтверждают описанное выше преимущество разработанного способа.



Рис. 3.41. Графики изменения сил по ходу закрытой прошивки заготовки

Технологический процесс производства вставок из стали X12M (ГОСТ 5950-73) осуществляется в следующей последовательности. Отрезка заготовок на токарном станке. Нагрев заготовок. Ковка заготовок трехкратной осадкой и протяжкой со степенями обжатия 30 ... 40% для получения структуры, по карбидной неоднородности не превышающей 3-го балла по ГОСТ 8233-56. Высокий отпуск (рекристаллизационный отжиг) заготовок. Очистка заготовок от окалины. Смазывание заготовок и омеднение пуансона.

Холодная закрытая прошивка заготовок в разработанном штампе для изготовления вставок. Нагрев вставок осуществляется в защитной газовой среде. Закалка вставок с охлаждением в масле. Низкотемпературный их отпуск для снятия остаточных напряжений.

Совместная притирка внешней поверхности каждой вставки и внутренней поверхности ее бандажа. Сборка вставок с бандажами. Чистовая обработка полостей вставок.

Режим нагрева заготовок вставок перед их ковкой выбран в соответствии с рекомендациями, приведенными в справочнике [27]. Заготовки загружают в печь, имеющую температуру 750 °C, и нагревают до 1140 °C. Ковку оканчивают при температуре 800 °C. С этой температуры заготовки охлаждают на воздухе, осуществляя предварительную термообработку – высокий отпуск, после которого твердость заготовок составляет 205 ... 215 *HB*. Очитка поверхности заготовок от окалины осуществляют их легким обстукиванием медной колотушкой и последующей обточкой на токарном станке. Поверхность заготовок перед закрытой прошивкой смазывают пастой дисульфида молибдена. Однако этой смазки недостаточно. Поэтому для создания антифрикционного покрытия перед закрытой прошивкой заготовок рабочую поверхность пуансонов подвергают омеднению опусканием рабочих частей пуансонов в насыщенный раствор медного купороса в 3%-ном водном растворе соляной кислоты.

Закалка штампованных вставок матриц осуществляется с температуры 1060 ... 1080 °С в масле, имеющем температуру 20 ... 60 °С. Для уменьшения образования окалины на поверхностях вставок нагрев перед закалкой осуществляют в муфельной электропечи, в которую от баллона через понижающий редуктор непрерывно подается азот под давлением 1,2 ... 1,5 атм.

Отпуск для снятия остаточных напряжений после закалки проводят путем нагрева вставок до 190 ... 210 °С и последующего их охлаждения в масле. После такой термообработки твердость вставок составляет 58 ... 60 *HRC*. Установка вставок матриц в бандажи осуществляется путем нагрева бандажа с целью увеличения размеров его полости, установки в него вставки и охлаждения бандажа на воздухе. После сборки с бандажами производятся шлифование полостей вставок для обеспечения заданных размеров, поскольку размер полости вставки изменяется при бандажировании, и последующая обработка полостей вставок чугунным притиром с использованием абразивных паст, с целью уменьшения шероховатости поверхности полости. При этом вставка вращается в патроне токарного станка со скоростью 1500 ... 1800 об/мин.

Фотографии бандажированных матриц, изготовленных с применением разработанного технологического процесса, приведены на рис. 3.42.



Рис. 3.42. Изготовленные бандажированные матрицы

## 4. РАЗРАБОТКА ОПЕРАЦИЙ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОРОШКОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ

# 4.1. Особенности производства спеченных заготовок для штамповки из них порошковых деталей

К основным материалам, используемым при производстве порошковых деталей, относятся порошки металлов, к вспомогательным – смазывающие вещества, которые должны обеспечить хорошую уплотняемость порошковой смеси, часто называемой шихтой. В качестве смазочного материала чаще всего применяют порошок стеарата цинка.

Большое влияние на формирование структуры детали оказывает химический состав порошков, который характеризует их склонность к окислению и образованию других соединений. Наличие в порошке трудновосстановимых оксидов нежелательно за исключением тех случаев, когда они придают материалам специальные свойства. Склонные к окислению металлические порошки в большинстве случаев обладают худшими технологическими свойствами. Плотные оксидные пленки, которые не восстанавливаются при высоких температурах и не диссоциируют, ухудшают спекаемость и механические свойства порошковых изделий. Однако с повышением окисленности порошка текучесть возрастает, так как уменьшается коэффициент трения между частицами и сглаживается их рельеф.

При изготовлении порошковых изделий, особенно высокоплотных, большое влияние на их структуру и свойства оказывают неметаллические включения. В связи с этим, чистоту металлических порошков и степень их окисленности тщательно контролируют, а при необходимости очистки используют дополнительные подготовительные операции: сепарацию, восстановительный отжиг и др. Только при использовании очищенной шихты из нее можно получить материалы, по свойствам не уступающие литым и катаным.

При изготовлении деталей из железного порошка, легированного другими материалами, осуществляют перемешивание различных порошковых компонентов (железной основы и легирующих элементов), уплотнение смеси и превращение смеси в сталь в результате металлургических процессов, протекающих при ее последующем спекании. Для производства металлических порошков применяются следующие способы: механическое измельчение твердых металлов, распыление жидких металлов, восстановление оксидов металлов.

Для механического измельчения ковких металлов применяют вихревые мельницы, в которых вращаются била со скоростью примерно 3000 об/мин. В мельницы засыпают отрезки проволоки, имеющие форму цилиндра, у которого длина незначительно превышает его диаметр. Дробление производится ударами вращающихся бил, отчасти – отбрасыванием кусков подвергаемого дроблению материала на ударные плиты и раздавливанием, а также истиранием на колосниковой решетке.

Другой высокопроизводительный и эффективный метод получения железных порошков – это диспергирование расплавов распылением. За рубежом основными являются RZ-процесс (распыление жидкого синтетического чугуна воздухом), WP-процесс (распыление стального расплава водой высокого давления) и Домар-процесс (распыление жидкого чугуна водой высокого давления). В нашей стране основным производителем железных порошков распылением является Сулинский завод [28-30].

При получении порошков железа методами восстановления сырьем служат оксиды железа или его хлористое соединение FeCl<sub>2</sub>. Химически чистые оксиды железа применяют редко, так как в этом случае железный порошок очень дорог. Одним из распространенных и эффективных способов является восстановление окалины или богатой окисленной железной руды твердым углеродом.

Обозначение железного порошка включает указание на способ его производства, например, «В» – восстановленный, химическую чистоту железа, например, 2 (чем меньше цифра, тем порошок чище и качественнее), предельную крупность частиц в микрометрах, например 160, и среднюю насыпную плотность, например 24 означает, что  $\gamma = 2,4$  г/см<sup>3</sup>, обозначение такого порошка – ПЖВ2.160.24. Если марка ПЖР – это распыленный воздухом железный порошок, а ПЖРВ – распыленный водой.

В промышленности чаще всего применяют порошки 3 и 4 частоты.

Различие в способах изготовления порошков обусловливает их различие в физических и технологических свойствах [1, 3, 5]. Для порошков, размолотых в вихревых мельницах, характерна «тарельчатая» форма частиц, для порошков, полученных распылением расплава и кристаллизацией частиц в свободном полете, характерна близкая к сферической форма частиц с незначительной неравномерностью, отражаемой соотношением наибольшей и наименьшей осей 1 ... 1,2. У порошков, полученных восстановлением оксидов, форма частиц, так называемая «губчатая», когда края частиц неровны, поверхность пористая, имеется значительная неравноосность: 2 ... 4. Форма частиц порошка оказывает влияние на его технологические свойства. Такое влияние называется технологической наследственностью [31]. Ниже, в п. 4.3, будут описаны способы изготовления высокоплотных порошковых деталей формованием шихты на этапе, предшествующем спеканию. При применении этих способов формования деталей технологическая наследственность, связанная со способом производства порошка, нивелируется.

Размер частиц большинства промышленных порошков находится в пределах от десятых долей микрона до десятых долей миллиметра и определяется методом и режимом производства. Так, например, при механическом измельчении размер частиц уменьшается с увеличением длительности размола, при распылении сжатым воздухом – с увеличением его давления.

Порошковые конструкционные детали из легированных материалов на железной основе являются основным видом продукции порошковой металлургии. Свойства порошковых сталей, как и сталей, получаемых традиционным металлургическим переделом, определяются их составом, технологией получения и структурой. Причем для порошковых сталей структурными факторами являются не только фазовый состав, размер зерна и параметры субструктуры, но и пористость, а также строение межчастичных контактов [20].

Выше, в п. 1.4, отмечалось, что при производстве деталей из железного порошка можно применить ХОШ, используя формованную из порошка и спеченную заготовку простой формы, как обычную компактную заготовку, отрезанную от прутка. Однако при этом имеется ряд особенностей, связанных с тем, что заготовка из порошка имеет остаточную пористость величиной 15 ... 18% по сравнению с компактной заготовкой.

Формование заготовки выполняют при одностороннем или двухстороннем перемещении уплотняющих порошок инструментов, рис. 4.1 [1]. На этом рисунке изображено формование полой цилиндрической заготовки. Полость формуется оправкой 3. Если использовать пуансоны 1, не имеюцие полости и, соответственно, отказаться от оправки 3, то приведенная на рис. 4.1 схема будет изображать формование цилиндрической заготовки без полости. При двухстороннем формовании как нижний, так и верхний пуансоны перемещаются относительно матрицы.



Рис. 4.1. Схемы формования заготовки: *a*) – заполнение рабочей полости матрицы; *б*) – одностороннее формование; *в*) – двухстороннее формование; *l* – пуансон, *2* – матрица, *3* – оправка, *4* – порошковая шихта

Двухсторонним формованием изготавливают высокие цилиндры или гладкие втулки, имеющие большие отношения высоты к толщине стенки. Ограничения, накладываемые на размеры заготовок при одностороннем и двухстороннем формованиях, обусловлены необходимостью достаточно равномерного распределения плотности в заготовке.

Неравномерность плотности вызывается действием напряжений контактного трения между уплотняемой порошковой шихтой с одной стороны и стенками матрицы – с другой. Одностороннее уплотнение используется при изготовлении заготовок типа дисков с отношением высоты к диаметру не более единицы, а также втулок с отношением высоты к минимальному значению толщины стенки меньше трех.

Наиболее распространена схема двухстороннего уплотнения, при котором одновременно с формующим пуансоном, как правило, движущимся сверху под действием верхнего ползуна пресса традиционной конструкции, в том же направлении перемещается матрица. При уплотнении по такой схеме скорость перемещения матрицы вдвое меньше скорости пуансона. Такое соотношение скоростей может быть задано при формовании заготовок на пресс-автоматах [32] в условиях крупносерийного производства деталей.

В условиях мелкосерийного производства и использования универсальных гидравлических прессов с верхним расположением ползуна при выполнении двухстороннего формования заготовок матрицу удерживают в состоянии «на весу» на этапе засыпки в нее порошковой шихты заранее отмеренного объема. Удержание матрицы в указанном состоянии может быть осуществлено, например, путем несложного устройства, показанного на рис. 4.2.

К матрице 4 диаметрально симметрично по ее внешней поверхности крепятся шарнирно два рычага 3, внутри которых также расположены шарниры. Противоположные концы рычагов крепятся шарнирно к тягам 2, вставленным в «Т-образные» пазы в ползуне 1 пресса.



Рис. 4.2. Устройство для удержания матрицы «на весу» при засыпке в нее порошковой шихты для двухстороннего формования заготовки

Матрица при засыпке в нее порошковой шихты висит на рычагах, как показано на рис. 4.2, слева, на такой высоте, чтобы расстояние между ее нижним торцом и верхним торцом установленной на столе пресса закаленной прокладки равнялось ходу нижнего пуансона, совершаемого им при формовании заготовки. При этом перед засыпкой нижний пуансон должен быть вставлен в полость матрицы и оперт на закаленную прокладку, установленную на столе пресса.

После засыпки в матрицу шихты в полость матрицы вставляют верхний пуансон, на его верхний торец устанавливают закаленную прокладку, имеющую такую толщину, чтобы практически не оставалось зазора между ней и рабочей поверхностью ползуна, и производят рабочий ход ползуна. Даже на начальном этапе уплотнения засыпанной в матрицу шихты сила контактного трения между поверхностью полости матрицы и шихтой удерживает матрицу от опускания ее на стол пресса, и при внедрении верхнего и нижнего пуансонов происходит двухстороннее формование заготовки. Оба пуансона одновременно навстречу друг другу углубляются в полость матрицы. Рычаги 3 складываются относительно промежуточного шарнира и не оказывают влияния на двухстороннее формование заготовки.

Формованные заготовки спекают, как было описано в п. 1.4 и, более подробно, – в работах [1, 3, 5, 29]. Также в этих работах описаны особенности нагрева и приведены режимы спекания формованных заготовок.

**При спекании** частички металла в местах контакта между собой могут расплавляться, проникать друг в друга [5]. Образуется твердая масса, свойства которой зависят от материала частиц и от того, как происходили уплотнение и нагрев. Процесс диффузии идет во времени (рис. 4.3), с увеличением температуры T и давления p время процесса уменьшается. На этапе спекания, обозначенном на рис. 4.3 буквой d), вследствие рекристаллизации зерна укрупняются, и комплекс механических характеристик изготовленной детали ухудшается. Режим спекания должен быть завершен раньше достижения этапа, обозначенного буквой d).



Рис. 4.3. Схема объединения структурных элементов порошковой заготовки при уплотнении и спекании в условиях чистой поверхности элементов:
 а), б), в), г) – сближение, соприкосновение, начало объединения и полное объединение элементов, д) – собирательная рекристаллиза

Показанный на рис. 4.3 идеальный процесс имеет место, когда поверхность частиц свободна от оболочки. Реальные частицы всегда имеют на поверхности инородные пленки оксидов, препятствующие диффузии. В известной мере пленки устраняются вакуумом или восстановительной средой, которую не всегда можно создать.

После спекания заготовка представляет собой твердое тело, имеющее остаточную пористость. Эта заготовка подвергается последующей холодной штамповке закрытой прошивкой, как и обычная, отрезанная от прутка цилиндрическая заготовка. После штамповки деталь подвергается термообработке, желательно в защитной атмосфере. С целью снятия остаточных напряжений производят отжиг, а для повышения прочности детали возможна закалка, если порошок легирован углеродом.

Место в технологических процессах диффузии, изображенной на рис. 4.3, разделяет формообразование при производстве порошковых деталей на штамповку спеченных порошковых заготовок, в которых диффузия произошла, и на штамповку непосредственно порошковой шихты, с последующим спеканием формованных полуфабрикатов. При штамповке непосредственно порошковой шихты, если деталь имеет сложную форму и шихту формуют традиционными способами уплотнения, формованный полуфабрикат является настолько непрочным, что для передачи его на последующее спекание требуются очень аккуратные ручные манипуляции.

Для упрочнения полуфабриката с участием авторов данной монографии разработан описанный ниже способ изготовления порошковых заготовок холодным формованием, совмещенным с их спеканием.

Спекание заготовок импульсами электрического тока позволяет проводить предварительное их упрочнение без использования специальных атмосфер. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.4.



Рис. 4.4. Схема пропускания импульсного тока через заготовку с использованием промежуточного трансформатора: U – напряжение на входе, BR1 – выключатель зарядного устройства, R1 –ограничительное сопротивление, D1 – выпрямитель, C1 – накопительный конденсатор, V1 – вольтметр, ST – пускатель, Tr1 – согласующий трансформатор с коэффициентом трансформации 70, P<sub>com</sub> – уплотняющая порошок сила

В установке использован импульс низкого (до 3 В) напряжения с высоковольтным инициированием разряда, C1=1400 мкФ, разряд производится через промежуточный согласующий трансформатор. При использовании приведенной на рис. 4.4 схемы с целью определения температуры нагрева образца применялась косвенная оценка плотности тока. На стадии тестирования установки вместо уплотняемой и спекаемой заготовки устанавливали отрезок провода, создающий короткое замыкание. Для большей точности тестирования установки применяли как отрезок медного провода, так и отрезок стального провода.

В результате проведения тестовых измерений было установлено, что средняя плотность тока составляла 6 А/мм<sup>2</sup>.

При спекании на рассмотренной установке диффузия между частицами, изображенная на рис. 4.3, практически отсутствует. В то же время при работе с заготовками, сформованными и предварительно спеченными импульсами электрического тока, можно применять средства механизации производственного процесса, аналогичные средствам при работе с заготовками, отрезанными от прокатанного прутка из литого сплава. Например, ссыпать их в контейнеры для транспортировки к методическим печам для последующего спекания в защитной атмосфере.

На описанной установке проведен многофакторный эксперимент с использованием 3 различных порошковых материалов на основе железа: NC100.24 [19]; ПЖРВЗ.200.28 (ГОСТ 9849-86); ULTRAPAC-LE [5].

В закрытой матрице, имевшей диаметр 16,25 мм, пуансоном производили уплотнение порошковой шихты с одновременным пропусканием импульса тока, в результате которого происходило спекание образца. Высота формованных образцов равнялась примерно половине их диаметра.

Для каждого из указанных порошков в экспериментах варьировали следующие факторы. Добавку в каждый из указанных порошков сажи в количестве 0,5% (по массе) и 1%. Это фактор  $X_1$ . Добавку в каждый из указанных порошков меди в количестве 0,5% (по массе) и 1%. Это фактор  $X_2$ . Температуру нагрева при спекании. Это фактор  $X_3$ . Его варьировали на уровнях 600 °C и 900 °C. Требуемая температура нагрева обеспечивалась подбором в процессе тестирования экспериментальной установки количества пропускаемых через заготовку импульсов электрического тока. Четвертым варьируемым фактором  $X_4$  являлась удельная сила уплотнения. Это сила Рсот (см. рис. 4.4), деленная на площадь поперечного сечения полости матрицы. Фактор  $X_4$  варьировали на уровнях 350 МПа и 700 МПа.

Построенные в результате эксперимента математические модели имеют следующий вид.

Для порошка NC100.24:

 $HB = 86,1 - 75,6 X_1 - 27,6 X_2 + 0,29X_3 + 0,036 X_4.$ 

Для порошка ПЖРВ3.200.28:

$$HB = 78,8 - 127,2X_1 - 31,2X_2 + 0,19X_3 + 0,22X_4.$$
(71)

Для порошка ULTRAPAC-LE:

 $HB = 266 - 15,6 X_1 - 67,6 X_2 - 0,019X_3 + 0,012X_4.$ 

В результате корреляционного анализа определена связь между твердостью образца *HB* и максимальной степенью его деформации осадкой є, при которой начинается разрушение образца. Также в результате корреляционного анализа определена связь между твердостью образца *HB* и соответствующей началу разрушения максимальной величиной удельной силы осадки *q*.

Таким образом, получены следующие выражения:

$$\varepsilon = 0,000814 HB + 0,186; q = 1,217 HB + 127,1.$$
 (72)

Анализ моделей (71) показывает, что увеличение добавок сажи и меди ухудшает результаты спекания. Увеличение температуры спекания улучшает результаты для заготовок из порошков NC100.24 и ПЖРВЗ.200.28, но для заготовок из порошка ULTRAPAC-LE увеличение температуры почти не имеет эффекта. Увеличение удельной силы, уплотняющей заготовки, улучшает результаты спекания.

Далее рассматривается заготовка, изготовленная двухсторонним формованием из порошковой шихты с приложением удельной силы величиной 600 ... 800 МПа и спеченная в печи. Выше, в п. 1.4, было показано, что при удельной силе больше 800 МПа на поверхности макропор в уплотняемой порошковой шихте образуются трещины, и заготовка разрушается. Поскольку заготовка, рассматриваемая далее, подвергнута спеканию и в ней прошли процессы диффузии (см. рис. 4.3), такую заготовку можно подвергать ХОШ с большими степенями деформации.

Выше, в п.1.2, была обоснована целесообразность применения термина «закрытая прошивка» вместо терминов «обратное выдавливание» и «прямое выдавливание» детали типа стакана. Однако это относилось к изготовлению деталей типа стаканов из прокатанных прутковых заготовок. В тоже время, при ХОШ таких деталей из спеченных порошковых заготовок их «прямое выдавливание» и «обратное выдавливание» приводят к существенному различию изготовленных деталей между собой, заключающемуся в равномерности распределения в них остаточной пористости. Поэтому в данном пункте монографии при анализе выдавливания на универсальных прессах, совместно с термином «закрытая прошивка», будет использован термин «обратное выдавливание» спеченной порошковой заготовки.

Область применения холодной закрытой прошивки (обратного выдавливания) спеченных заготовок из порошков на железной основе, как и ХОШ компактных прутковых заготовок, ограничена очень большими величинами удельных деформирующих заготовки сил. При таких удельных силах прошивающий полость в заготовке пуансон может разрушиться. Даже если не произойдет его разрушения, пуансон может иметь низкое сопротивление усталости, при котором ХОШ является экономически нецелесообразной.

Другой ограничивающей область применения холодной закрытой прошивки спеченных заготовок из порошков на железной основе причиной является неравномерность распределения остаточной пористости по высоте изделия при применении традиционных схем штамповки.

При закрытой прошивке (обратном выдавливании) заготовки по традиционной схеме в неподвижно закрепленной матрице пуансон внедряется в пористую заготовку, постепенно формируя в ней полость и одновременно осаживая заготовку и тем самым повышая ее плотность. Однако верхняя часть стенки изготовленной детали, сформированная в начале внедрения пуансона, сохраняет почти такую же остаточную пористость, какую имела заготовка до ее штамповки (рис. 4.5).



**Рис. 4.5.** Рыхлая горловина у детали, изготовленной закрытой прошивкой заготовки в неподвижной матрице

Такая пористость в области горловины штампованной заготовки может не представлять большой проблемы, если в технологическом процессе изготовления детали после ХОШ осуществляется последующее изменение формы горловины, например, производится ее обжим. Обжим горловины авторы данной монографии применили при производстве корпуса гидроцилиндра (см. поз. 3 на рис. 4.6), изготавливаемого с применением холодной закрытой прошивки (обратного выдавливания) в неподвижно закрепленной матрице цилиндрической спеченной заготовки из железного порошка. При обжиме остаточная пористость горловины корпуса была существенно уменьшена по сравнению с пористостью на рис. 4.5.



Рис. 4.6. Конструкция гидроцилиндра: 1 – тормоз; 2 – бандаж; 3 – корпус; 4 – пружина; 5 – шток; 6 – поршень

При других технологиях обработки, сопровождающей закрытую прошивку (обратное выдавливание) полости в заготовке, или при отсутствии такой обработки вообще, остаточную пористость горловины надо преодолевать непосредственно на этапе закрытой прошивки полости.

Уменьшение остаточной пористости можно провести как на стадии изготовления исходной заготовки формованием до ее спекания, так и на стадии закрытой прошивки уже спеченной пористой исходной заготовки.

Авторы данной монографии в п. 4.2, ниже по тексту, изложили свои разработки по уменьшению пористости и повышению равномерности ее распределения в объеме детали типа стакана на стадии его штамповки из спеченной имеющей остаточную пористость порошковой заготовки.

В данном пункте рассмотрены способы повышения плотности заготовки при ее формовании, предшествующем ее спеканию. Также повышения плотности заготовки при ее формовании, чередующемся с ее спеканием.

Разработан способ изготовления спеченных заготовок деталей из материалов на основе железа, включающий смешение порошков, предварительное формование заготовок при удельных силах на пуансонах 600 .... 800 МПа, предварительное их спекание в водороде при 900 ... 1000 °C. Далее производится повторное формование заготовок при удельных силах 900 ... 1000 МПа, окончательное их спекание в водороде при 1100 .... 1200 °C и прокатка с обжатием при давлении 800 ... 1500 МПа. При этом с целью повышения качества изделий после прокатки производят холодную закрытую прошивку осевой полости в заготовке при удельной силе на пуансоне 1200 ... 1500 МПа.

Также разработан способ изготовления деталей из металлических порошков на основе железа, включающий подготовку шихты, предварительное формование из шихты детали, выжиг пластификатора, окончательное формование детали, ее спекание. При этом окончательное формование производят с относительной степенью деформации 5 ... 15% при температуре выжига пластификатора, а затем производят спекание в течение 0,15 ... 0,3 ч.

Оба указанных способа позволяют изготовить порошковые заготовки, имеющие меньшую остаточную пористость, чем при однократном формовании в закрытой матрице, т.е. меньше, чем 15 ... 18%. Однако реализация обоих рассмотренных способов требует существенных затрат.

Технологически значительно проще получить некоторое повышение плотности формуемых заготовок путем **воздействия на матрицу штампа**, в котором в это время осуществляется формование заготовок, **магнитными импульсами**. Исследование такого способа уплотнения порошковой шихты описано ниже.

После помещения порошковой шихты, содержащей в качестве смазочного материала порошок стеарата цинка в количестве 0,5 ... 1% (по массе), в закрытую матрицу пуансоном создавали удельную силу *p* (см. рис. 4.7).



**Рис. 4.7.** Схема формования порошковой заготовки: *1* – магнитно-импульсная установка; *2* – индуктор; *3* – матрица; *4* – пуансон; *5* – порошковая заготовка; *6* – контрпуансон

Удельную силу варьировали в пределах 600 ... 800 МПа. В исследуемом способе формования матрица была помещена в индуктор, во время формования каждой заготовки осуществлялось по три разряда индуктора.

Также была применена аналогичная магнитно-импульсная обработка порошковой шихты, до ее засыпки в матрицу. Для этого исходную шихту в пластиковом контейнере помещали внутрь индуктора магнитно-импульсной установки и подвергали воздействию разрядов.

В проведенном исследовании применен железный порошок марки ПЖВ4.160.26. Этот порошок уплотняется хуже, чем другие железные порошки (отечественные и зарубежные), этим объясняются невысокие значения плотности формованных в эксперименте заготовок [30].

Одним из факторов в эксперименте являлся масштабный (фактор  $X_5$ ) диаметр формованной заготовки. Формовали заготовки с диаметрами 25 и 78 мм, высота формованных заготовок составляла 2/3 от их диаметров. Заготовки диаметром 25 мм формовали на испытательной машине «Инстрон» номинальной силой 3,5 МН, а заготовки диаметром 78 мм – на прессе мод. К03.032, имевшем номинальную силу 5 МН. Скорость деформирования составляла 0,2 мм/с.

Кроме масштабного, варьировали и другие факторы, указанные в табл. 32. К ним относятся следующие. Удельная сила р, действующая на заготовку со стороны формующего пуансона (фактор  $X_4$ ); содержание в шихте стеарата цинка (фактор  $X_3$ ). Также воздействие импульсным магнитным полем на порошковую шихту до начала формования или его отсутствие (фактор  $X_2$ ); воздействие импульсным магнитным полем на порошковую шихту в процессе формования или его отсутствие (фактор  $X_1$ ).

Был задан следующий вид математической модели:

$$\gamma [\%] = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_{12} X_1 X_2 + b_{15} X_1 X_5, \quad (73)$$

No or	V vA /sr	V vA /ve	V 0/		$\gamma_{_{3\kappa c \pi}}$	$\gamma_{pac4}$	
JN≌ 011.	$A_1, KA/M$	$A_1, KA/M \mid A_2, KA/M \mid A_3, 0 \mid A_4, MIII \mid A_5, MN$		л <sub>5</sub> , мм	%		
1	0	0	0,5	600	25	81,78	82,12
2	10	0	0,5	600	78	83,95	83,55
3	0	10	0,5	600	78	83,69	83,04
4	10	10	0,5	600	25	83,31	83,84
5	0	0	1	600	78	82,20	83,39
6	10	0	1	600	25	83,44	82,82
7	0	10	1	600	25	81,12	80,98
8	10	10	1	600	78	82,70	83,10
9	0	0	0,5	800	78	84,70	84,38
10	10	0	0,5	800	25	83,90	84,47
11	0	10	0,5	800	25	82,28	82,63
12	10	10	0,5	800	78	85,20	84,82
13	0	0	1	800	25	82,87	82,32
14	10	0	1	800	78	83,30	83,74
15	0	10	1	800	78	82,80	82,56
16	10	10	1	800	25	84,52	84,03

Табл. 32. Матрица плана эксперимента в натуральном X<sub>i</sub> масштабе и результаты опытов

После проведения эксперимента и расчета коэффициентов модель (73) приняла следующий вид:

$$\gamma [\%] = 79,462 + 0,206X_1 - 0,0415X_2 - 1,464X_3 + 0,00461X_4 + 0,0251X_5 + 0,007X_1X_2 - 0,00253X_1X_5.$$
(74)

В модель (74) значения факторов следует подставлять в единицах, указанных в табл. 32.

Анализ модели (74) показал, что при магнитно-импульсном воздействии плотность порошковой заготовки повышается более существенно, чем при увеличении удельной силы сжатия шихты от 600 до 800 МПа. Предварительная магнитно-импульсная обработка порошковой шихты перед засыпкой в матрицу усиливает эффект магнитно-импульсного воздействия при формовании заготовок.

Кроме применения магнитно-импульсных воздействий при формовании порошковых заготовок, авторами данной монографии разработан еще более эффективный способ увеличения их плотности, который будет описан ниже, в п. 4.3.

### 4.2. Снижение величин удельных сил холодной закрытой прошивки спеченных заготовок из материалов на железной основе

С целью повышения прочности деталей из порошков на железной основе в шихту, из которой формуют их цилиндрические заготовки, добавляют легирующий порошок графита. Порошок графита при спекании заготовок насыщает углеродом материал основы. Однако при закрытой прошивке (обратном выдавливании) легированных углеродом спеченных заготовок удельная сила на пуансоне возрастает по сравнению с прошивкой заготовок из нелегированного железного порошка. В результате сопротивление пуансонов усталости становится недостаточным для рационального применения операции ХОШ.

В приведенном ниже исследовании оценена возможность снижения удельной силы ХОШ использованием смазочного материала высокого качества.

Выполнено исследование зависимости удельной силы q закрытой прошивки (обратного выдавливания) спеченных заготовок из железного порошка ПЖВ2.160.28 от выбранных факторов: процентного содержания графита в шихте ( $X_1$ ), добавки ультрамелкодисперсного алмазного порошка в смазку – пасту MoS<sub>2</sub> ( $X_2$ ) и диаметра пуансона ( $X_3$ ). Штамповку проводили в матрице диаметром 30 мм, исходная плотность заготовок зависела от содержания углерода и составляла: для углеродосодержащих заготовок  $\gamma_0 = 6,4$  г/см<sup>3</sup>, для не содержащих углерод заготовок  $\gamma_0 = 6,85$  г/см<sup>3</sup>.

Значения факторов и интервалы их варьирования приведены в табл. 33. Результаты опытов приведены в табл. 34.

Из результатов опытов следует, что даже при легировании железного порошка 0,5% С, сопротивление усталости пуансонов, изготовленных, например, из быстрорежущей стали P6M5 и закаленных на твердость 61 ... 63 *HRC*, будет удовлетворительным с технико-экономических позиций для целесообразного применения ХОШ, поскольку удельная сила на пуансоне не превышает 2500 МПа.

Факторы	$X_1$	X2	<i>X</i> <sub>3</sub> , мм
Основной уровень (X <sub>i0</sub> )	0,25 % C	_	21
Интервал варьирования ( $\Delta X_i$ )	0,25 % C	_	1
Верхний уровень	0,5 % C	Смазка с наличием алмазной добавки	22
Нижний уровень	Без углерода	Смазка без алмазной добавки	20

Табл. 33. Интервалы варьирования факторов

Значения факторов	X <sub>1</sub> ,%	0	0,5	0	0,5	0	0,5	0	0,5
	$X_2$	0	0	1	1	0	0	1	1
	<i>X</i> <sub>3</sub> , мм	20	20	20	20	22	22	22	22
Уд. сила, МПа	$q_{_{ m эксп}}$	1672	2462	1874	2150	1776	2278	2141	2445
	$q_{_{ m MOJ}}$	1797	2443	1814	2104	1757	2403	2095	2385

Табл. 34. Результаты опытов

Заданная форма математической модели следующая:

$$q = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3.$$
(75)

После расчета коэффициентов модели (75) проведена статистическая оценка их значимости, и из модели исключены члены с коэффициентами, значимость которых не подтвердилась. Модель (75), приняла следующий вид:

 $q[\text{M}\Pi\text{a}] = 2196,75 + 1292X_1 - 3192,5X_2 - 20X_3 - 712X_1X_3 + 160,5X_2X_3.$ (76)

Рассчитанные по модели (76) значения удельной силы закрытой прошивки (обратного выдавливания) спеченных заготовок из железного порошка приведены в нижней строке табл. 34.

Анализ математической модели (76) показал следующее.

Влияние добавки в смазку алмазного порошка на величину силы прошивки невелико, о чем свидетельствует незначимая величина коэффициента b<sub>2</sub>. Эффект взаимодействия алмазной добавки в смазке с содержанием углерода в заготовке выразился в заметном снижении силы закрытой прошивки при применении алмазной добавки на заготовках, содержащих углерод, по сравнению с применением алмазной добавки на заготовках, не содержащих углерод. Это объясняется меньшей плотностью углеродосодержащих заготовок. Смазка, заполнив отдельные поры, уменьшила трение внутри заготовки в приконтактных с инструментом областях. Эффект взаимодействия алмазной добавки с диаметром пуансона следует из увеличения удельной силы прошивки при увеличении диаметра пуансона. При этом возрастает плотность в деформируемой заготовке, пор в приконтактной с инструментом области становится меньше, что приводит к отмеченному эффекту. Таким образом, введение в смазку алмазного порошка более эффективно на более пористых заготовках. Вне зависимости от пористости заготовки, качество поверхности, оцениваемое визуально при использовании смазки с алмазной добавкой значительно выше, чем без добавки (достигается зеркальная поверхность).

Из полученной модели следует довольно слабое влияние диаметра пуансона на удельную силу закрытой прошивки. Это объясняется малым выбранным интервалом варьирования этого фактора. Наиболее сильно удельная сила штамповки зависит от процентного содержания графита в шихте, увеличение которого приводит к росту силы холодной закрытой прошивки заготовки.

Ниже рассмотрен технологический процесс изготовления детали, у которой высокая поверхностная прочность создается путем легирования углеродом внешнего поверхностного слоя изготавливаемой детали.

С целью поверхностного легирования спечённую порошковую заготовку, предназначенную для изготовления из нее посредством ХОШ детали типа стакана, вначале покрывают обмазкой с большим содержанием графита или сажи [1, 3, 5], рис. 4.8.

Заготовку помещают в матрицу, как показано на рис. 4.8, слева от оси. Заготовка опирается на подпружиненный плунжер. Диаметр заготовки  $d_0$  на 0,5 ... 1 мм меньше, чем диаметр нижней части полости матрицы d. Верхний пуансон имеет посадку без зазора по поверхности верхней части полости матрицы. Между заготовкой и внутренней поверхностью верхней части полости матрицы, имеющей диаметр D, засыпают порошковую композицию, состоящую из стеарата цинка (50% по объему композиции), смешанного с порошками графита и др. легирующих элементов.

При опускании верхнего пуансона заготовка проталкивается в нижнюю часть полости матрицы, а уплотняемый порошковый материал, который окружал заготовку, создает на поверхности заготовки слой обмазки, рис. 4.9.

Из заготовок с обмазкой ХОШ изготавливают детали типа стаканов, при этом действуют удельные силы величиной 2000 ... 2500 МПа, и материал обмазки вдавливается в поры в поверхностном слое спеченной заготовки.



Рис. 4.8. Схема нанесения обмазки на поверхность заготовки



Рис. 4.9. Заготовка с нанесенным на нее слоем обмазки

Для штамповки стакана заготовку помещают в матрицу, имеющую диаметр полости, равный диаметру заготовки с обмазкой. На первом этапе деформирования при холодной закрытой прошивке происходит осадка заготовки в полости матрицы. Поскольку материал обмазки оказывает незначительное сопротивление деформированию спечённой заготовки, материал заготовки заполняет пространство в матрице, первоначально занятое обмазочным слоем. При этом единственным выходом материала обмазки является проникновение в поры в поверхностном слое спеченной заготовки. В конце закрытой прошивки остаточная пористость в детали становится минимальной, а частицы легирующих порошков распределяются в поверхностном слое детали, смешиваясь с частицами спеченного железного порошка, являющегося основой детали.

При этом на этапе закрытой прошивки заготовки существенно снижается контактное трение. Для лучшего протекания процесса целесообразно подогревать матрицу. После ХОШ детали производится ее высокотемпературный отжиг для снятия остаточных напряжений. В процессе этой обработки происходит диффузионное взаимодействие легирующих элементов и материала основы (железа), и на поверхности детали образуется порошковая сталь.

В проведенном исследовании из заготовки с обмазкой холодной закрытой прошивкой изготавливали деталь типа стакана, у которой наружный диаметр 32 мм и диаметр полости 20 мм. Перед деформированием заготовки матрицу нагревали с целью повышения пластичности обмазочного слоя и облегчения внедрения его в поры заготовки.

Исследовано влияние плотности исходных заготовок, толщины слоя обмазки, предпочтительности применения графита или сажи в обмазке, температуры нагрева матрицы на величину силы ХОШ деталей с указанными выше размерами из спеченных из железного порошка ПЖВ2.160.28 заготовок. По результатам эксперимента построена математическая модель зависимости силы закрытой прошивки от указанных факторов, и по ней методом крутого восхождения по поверхности отклика определены значения факторов, обеспечивающие наименьшую силу прошивки.

Факторы, значения их основных уровней и интервалов варьирования приведены в табл. 35. Результаты опытов приведены в табл. 36.

В исследовании принят следующий вид математической модели:

$$y [\%] = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4.$$
(77)

Формулы, связывающие величины факторов в натуральном и кодированном масштабах, следующие:

$$x_1 = (X_1 - 87,7) / 1; x_2 = (X_2 - 1,5) / 0,5; x_3 = (X_3 - 0,5) / 0,5, x_4 = (X_4 - 220) / 20.$$

Факторы	Плотность заготовок, $\%(X_1)$	Толщина слоя обмазки, мм (X <sub>2</sub> )	Состав материала обмазки (X <sub>3</sub> )	Температура матрицы, °С ( <i>X</i> <sub>4</sub> )	
Основные уровни ( <i>Xi</i> <sub>0</sub> )	87,7	1,5	_	220	
Интервалы варьирования $(\Delta X_i)$	1	0,5	_	20	
Верхние уровни	88,7	2,0	Сажа + стеарат цинка	240	
Нижние уровни	86,7	1,0	Графит + стеарат цинка	200	

Табл. 35. Значения основных уровней и интервалов варьирования факторов

После расчета коэффициентов модели (77) проведена статистическая оценка их значимости, и из модели исключены члены с коэффициентами перед *x*<sub>2</sub> и *x*<sub>3</sub>, значимость которых не подтвердилась.

Таким образом, получено следующее уравнение регрессии:

$$y = 612, 5 - 22, 5 x_1 - 25 x_4.$$
(78)

Методом крутого восхождения по поверхности отклика исследована возможность снижения силы закрытой прошивки. Последовательность реализации этого этапа исследования показана в табл. 37.

В результате установлено, что увеличение температуры нагрева матрицы до 280 °С при одновременном снижении плотности заготовки до 84,7 % позволяет уменьшить силу закрытой прошивки на 23 % по сравнению со средней силой, зафиксированной в 8 опытах в табл. 36.

	<i>X</i> <sub>1</sub> ,%	0	0,5	0	0,5	0	0,5	0	0,5
Значения	Х <sub>2</sub> ,мм	0	0	1	1	0	0	1	1
факторов	X3	20	20	20	20	22	22	22	22
	<i>X</i> ₄,°C	240	200	200	240	200	240	240	200
Curro (D) u	<i>Р</i> , кН	1672	2462	1874	2150	1776	2278	2141	2445
сила ( <i>Г</i> ) и удельн. сила ( <i>q</i> )	<i>q</i> , МПа	1797	2443	1814	2104	1757	2403	2095	2385

Табл. 36. Результаты опытов

Факторы	Плотность заготовок, $\%(X_1)$	Температура нагрева матрицы, °С $(X_4)$	Сила закр. прошивки, кН
b <sub>i</sub>	- 22,5	- 25	
$b_i \Delta X_i$	- 22,5	- 500	
Шаг	1	20	
X <sub>i0</sub>	87,7	220	
Реализованный опыт	86,7	240	565
Мысленный опыт	85,7	260	517,5
Мысленный опыт	84,7	280	470

Табл. 37. Крутое восхождение в направлении уменьшения силы

Это связано с облегчением затекания обмазочного слоя в поры при увеличении температуры нагрева матрицы и пористости заготовки. Заполнивший поры обмазочный слой уменьшает трение между частицами железного порошка и способствует снижению силы закрытой прошивки.

При температуре нагрева матрицы свыше 280 °С работа со штампом существенно затрудняется, поэтому не исследовалась.

Применение графита и стеарата цинка в качестве смазочного материала при ХОШ спеченных заготовок из железных порошков известно. Новым результатом, полученным в проведенном исследовании, является установление значений пористости исходной заготовки и температуры нагрева матрицы, при которых сила закрытой прошивки является наименьшей. Также установление того, что толщина обмазочного слоя не влияет на величину силы закрытой прошивки, когда она составляет больше 5% от диаметра заготовки.

Благодаря снижению контактного трения при закрытой прошивке спеченных заготовок по этой технологии были изготовлены детали рассматриваемого типа с поверхностным слоем, легированным порошками следующих компонентов: 0,6% C; 1% Ni; 2% Mn; 3% Cu. Удельная сила ХОШ таких деталей составила всего лишь 2350 МПа.

Снижение удельной силы на пуансоне при закрытой прошивке и одновременно повышение плотности изготавливаемой детали типа стакана и уменьшение неравномерности распределения остаточной пористости в детали можно осуществить созданием активно направленных напряжений контактного трения между деформируемой спеченной заготовкой и полостью матрицы. На рис. 4.10 приведена схема штамповки спеченной порошковой заготовки в «плавающей» матрице [3].



**Рис. 4.10.** Схема закрытой прошивки (обратного выдавливания) спеченной порошковой заготовки в плавающей матрице: *a*) осадка заготовки, *б*) начало закрытой прошивки, *в*) окончание прошивки

На начальной стадии (рис. 4.10, *a*) пуансон 4 уплотняет спеченную порошковую заготовку 3, опирающуюся на нижний контрпуансон (выталкиватель) 2, высота заготовки уменьшается. При этом вследствие трения на поверхности контакта заготовки с матрицей *I* матрица перемещается вниз на расстояние  $\Delta_1$ , и напряжения контактного трения  $\tau_a$  способствуют лучшему уплотнению заготовки. После того, как заготовка уплотнилась, начинается вытекание материала в полость между заготовкой и матрицей (рис. 4.10, *б*). Напряжения контактного трения между формирующейся стенкой стакана и поверхностью полости матрицы направлены вверх (рис. 4.10, *в*) и способствуют вытеканию материала из-под торца пуансона 4. При этом матрица под действием напряжений контактного трения  $\tau_a$  поднимается на расстояние  $\Delta_2$ .

Сила пружин 5 незначительна, их назначение – только уравновесить массу матрицы. Перемещение матрицы происходит вследствие трения по поверхности контакта матрицы с заготовкой. При этом удельная сила, действующая на пуансон 4, снижается на величину до 10% по сравнению с закрытой прошивкой (обратным выдавливанием) в неподвижно закрепленной матрице. Наличие пружины 5 отличает закрытую прошивку в плавающей матрице спеченных порошковых заготовок от закрытой прошивки компактных заготовок. Это связано с тем, что для лучшего уплотнения порошковой заготовки матрица на начальном этапе совершает перемещение вниз на  $\Delta_1$ , а при штамповке компактных заготовок этого не требуется.

При закрытой прошивке (обратном выдавливании) в «плавающей» матрице позиция 4.11, а соответствует осадке пористой заготовки, а позиция 4.11, *б* – закрытой прошивке полости в заготовке при наличии активно направленных напряжений контактного трения [1, 3, 5, 31].



Рис. 4.11. Закрытая прошивка спеченной порошковой заготовки в плавающей матрице

После завершения уплотнения заготовки и стабилизации формирования трубной части детали матрица перемещается под действием контактного трения навстречу пуансону с возрастающей по мере закрытой прошивки (обратного выдавливания) заготовки скоростью. На заключительном этапе закрытой прошивки (рис. 4.11,  $\delta$ ) скорость матрицы равна скорости истечения материала в зазор между пуансоном и матрицей.

На рис. 4.11 обозначено:  $v_{3ar}$  – скорость перемещения контактной поверхности заготовки;  $v_{M}$  – скорость перемещения матрицы;  $v_{ck}$  – скорость скольжения матрицы по заготовке;  $\tau_{a}$  – активно направленные напряжения контактного трения. Эпюры vck получены путем сложения эпюр  $v_{3ar}$  и  $v_{M}$ . Наличие ординат vck на эпюрах, приведенной слева, на рис. 4.11, *a*, и приведенной справа на рис. 4.11, *б*, соответствует наличию активно направленных напряжений  $\tau_{a}$ , способствующих повышению плотности заготовки на начальном этапе закрытой прошивки ее полости и снижению силы на пу-

ансоне на заключительном этапе закрытой прошивки (обратного выдавливания) заготовки.

При закрытой прошивке (обратном выдавливании) в плавающей матрице уплотнение и осадка заготовки на начальных этапах происходят более интенсивно, чем образование трубной части детали (рис. 4.12).

Контактное трение со стороны матрицы, перемещающейся навстречу течению материала в стенку детали, способствует



Рис. 4.12. Поэтапное формоизменение спеченной порошковой заготовки при ее закрытой прошивке (обратном выдавливании) в плавающей матрице

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

повышению плотности детали. Такое перемещение матрицы в процессе деформирования заготовки имеет только положительное значение. На начальной стадии, когда заготовка не уплотнена, удельная сила на пуансоне сравнительно небольшая. На этой стадии целесообразно препятствовать течению материала в стенку детали. Это осуществляется напряжениями контактного трения, которые, согласно выполняемой ими роли, являются активно направленными.

После того, как достигнуто уплотнение заготовки, и удельная сила закрытой прошивки возросла, трение на поверхности сформировавшейся трубной части детали помогает перемещению матрицы в сторону течения материала в стенку детали, созданию активно направленных напряжений контактного трения на уровне расположенного под торцом пуансона очага пластической деформации, способствующих снижению силы на пуансоне. В результате изготавливают деталь с более равномерно, чем при штамповке в неподвижной матрице, распределенной по высоте детали плотностью (рис. 4.13).



Рис. 4.13. Повышение равномерности распределения плотности по высоте детали по сравнению с рис. 4.5

При создании активно направленных напряжений контактного трения между внешней поверхностью деформируемой заготовки и поверхностью полости матрицы возникает соблазн использовать смазочный материал худшего качества, чем при штамповке по традиционным схемам, когда трение реактивно, и качественный смазочный материал снижает его отрицательное влияние. Снижать требование к качеству смазочного материала при использовании активно направленных напряжений контактного трения нецелесообразно, так как одним из важных преимуществ ХОШ является изготовление деталей, имеющих малую шероховатость поверхности. Это достигается только при высоком качестве смазочного материала.

При ХОШ деталей из формованных и спеченных заготовок из материалов на железной основе фосфатирование заготовок не применяется, в отличие от ХОШ деталей из прокатанных прутковых заготовок. Это связано с тем, что фосфатирование осуществляется окунанием заготовок в химические растворы. Спеченная порошковая заготовка имеет остаточную пористость. При ее окунании в раствор поры заполнятся жидкостью, которая при последующем деформировании заготовки и уменьшении ее пористости вытекает, прорезая каналы в заготовке и, таким образом, разрушая ее. Вокруг пресса, на котором производится штамповка, образуются лужи. Сформованные и спеченные заготовки для XOШ из порошков на железной основе смазывают пастой дисульфида молибдена (MoS<sub>2</sub>). Из-за наличия пористости поверхности при существенном формоизменении спеченной порошковой заготовки на поверхность выходят частицы из приповерхностных слоев. Эти частицы смазаны хуже, чем те, которые были на поверхности исходной заготовки. Таким образом, контактное трение между деформируемой XOШ порошковой заготовкой и инструментом всегда больше, чем при XOШ отрезанных от прутка и аналогично смазанных железных или стальных заготовок.

Поскольку в данной монографии есть разделы, посвященные расчету напряжений в деформируемых заготовках, и в этих разделах в формулах используется коэффициент (фактор) контактного трения, следует подставлять в формулы его величину, равную 0,2.

Для изготовления изделия с большей плотностью, чем при закрытой прошивке в плавающей матрице, рационально на начальном этапе создавать дополнительное сопротивление истечению материала в трубную часть изделия путем перемещения матрицы от дополнительного ее привода.

Для этого на первом этапе закрытой прошивки принудительно перемещают матрицу l со скоростью  $v_{_{M}}$  и создают по всей поверхности контакта заготовки с матрицей напряжения контактного трения  $\tau_{a}$  (рис. 4.14, слева) в направлении, противоположном истечению материала деформируемой заготовки 2 в стенку стакана. Заготовка при этом продвигается контрпуансоном 4 с силой P, а пуансон 3 осуществляет закрытую прошивку ее полости.



**Рис. 4.14.** Схема закрытой прошивки спеченной порошковой заготовки с активно направленными напряжениями контактного трения: *Р* – деформирующая сила,  $v_{\rm M}$  – скорость матрицы

На втором этапе создают напряжения контактного трения  $\tau_a$  (рис. 4.14, справа), способствующие деформированию заготовки 2 и разгружающие пуансон 3. Для этого принудительно перемещают матрицу *I* в направлении истечения материала со скоростью  $v_{\rm M}$ , превышающей скорость истечения. Используют прессы, имеющие дополнительный привод для принудительного перемещения матрицы и создания активно направленной силы контактного трения большей, чем при прошивке в плавающей матрице, величины.

Такие прессы описаны ниже, в разделе 5. Штамповка на таком прессе позволяет повысить плотность деформируемой заготовки и одновременно снизить удельную силу на пуансоне существеннее, чем при закрытой прошивке в плавающей матрице. При штамповке на прессах с принудительным приводом матрицы, как уже отмечалось ранее в конце п. 1.2, меняя скорость перемещения матрицы, можно создать условия контактного трения соответствующие как прямому, так и обратному выдавливанию. Поэтому в комментарии к схеме на рис. 4.14 термин закрытая прошивка не конкретизируется.



Рис. 4.15. Типовая осциллограмма, записанная при закрытой прошивке спеченной заготовки в принудительно перемещаемой матрице

Типовая осциллограмма, записанная при ХОШ стаканов, имевших внешний диаметр 30 мм, на прессе с дополнительным приводом для перемещения матрицы приведена на рис. 4.15.

Как видно на рис. 4.15, удельная сила на пуансоне (см. линию I), по мере его перемещения  $S_{\rm n}$ , на этапе осадки заготовки (см. рис. 4.14, слева) возрастает до начала движения матрицы  $S_{\rm M}$  (линия 2) в направлении формирования стенки изделия. После начала движения матрицы удельная сила постепенно уменьшается по мере возрастания площади контакта матрицы и заготовки и увеличения активно направленной силы контактного трения. На приведенной для сравнения кривой 3, отражающей закрытую прошивку (обратное

выдавливание) в неподвижной матрице, видно, что сила непрерывно возрастает по мере увеличения плотности заготовки под торцом пуансона и увеличения поверхности контакта, по которой действуют реактивно направленные напряжения контактного трения.

Исследована и описана математическими моделями операция холодной закрытой прошивки детали типа стакана из формованной и спеченной заготовки из железного порошка. Построены модели зависимости удельной силы закрытой прошивки, средней плотности штампованного стакана и неравномерности остаточной пористости в штампованном стакане, в которых учитываются направления напряжений контактного трения.

Факторы в эксперименте перечислены далее. Наличие на начальном этапе закрытой прошивки способствующего уплотнению заготовки перемещения матрицы в сторону, противоположную течению материала в стенку стакана (фактор  $X_1$ ). Наличие перемещения матрицы на последующем этапе закрытой прошивки в направлении течения материала в стенку стакана (фактор  $X_2$ ). Отношение диаметра полости матрицы к диаметру пуансона R, а также пористость б формованной и спеченной исходной заготовки для закрытой прошивки.

Фактор  $X_1$  учитывает наличие трения заготовки о матрицу, способствующего уплотнению заготовки, а фактор  $X_2$  – наличие трения, способствующего истечению уплотненного материала в стенку детали:  $X_1 = 0$ , если трение препятствовало уплотнению заготовки, и  $X_1 = 1$ , если способствовало уплотнению. Аналогично фактор  $X_2 = 0$ , если трение препятствовало истечению уплотненного материала в стенку детали на стадии ее формирования и  $X_2 = 1$ , если трение способствовало истечению материала.

Зависимыми переменными являются: удельная сила закрытой прошивки *q* в МПа  $(y_1)$ , средняя плотность изделия в % по отношению к теоретической плотности железа  $(y_2)$ , неравномерность распределения остаточной пористости в изделии в %  $(y_2)$ .

После проведения эксперимента в соответствии с матрицей плана, приведенной в табл. 38, и обработки его результатов получены следующие математические модели. Модель для удельной силы закрытой прошивки имеет вид:

$$q[\text{M}\Pi\text{a}] = 47532,78 - 93,33 X_2 - 206,68 R + 163,83 \delta_2 - 5455,66 \delta.$$
(79)

Модель для плотности изделия:

$$\gamma \,[\%] = 79,05 + 1,09 \,X_1 - 16,7 \,R_2 + 41,76 \,R - 0,441 \,\delta. \tag{80}$$

Модель для неравномерности распределения остаточной пористости:

$$\delta_{\max} - \delta_{\min} [\%] = -2,71 - 2,92 X_1 + 5,86 R.$$
(81)

Полученные модели подтверждают правильность сделанного в предшествовавшем эксперименту анализе предположения о рациональности создания дополнительных напряжений контактного трения между заготовкой и матрицей, препятствующих истечению материала в стенку изделия на этапе уплотнения заготовки. Также – правильность предположения о рациональности создания, после окончания уплотнения и стабилизации закрытой прошивки дополнительных напряжений контактного трения, способствующих истечению материала в стенку изделия.

Модели позволяют численно оценить влияние направления напряжений контактного трения на рассмотренные выходные параметры при различных

размерах детали и плотности предварительно формованной и спеченной заготовки для закрытой прошивки.

№ оп.	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	R	δ %	<i>У</i> 1 ( <i>q</i> ) МПа	<i>y</i> <sub>2</sub> (γ) %	$\begin{array}{c} \mathcal{Y}_{3} \\ (\delta_{\max} - \delta_{\min}) \\ \% \end{array}$
1	0	0	1,75	17,5	1830	93,05	7,11
2	0	0	1,5	16,65	1860	96,3	6,8
3	1	0	1,25	15,8	1980	99,3	2,11
4	0	0	1,5	15,8	1950	97,1	5,2
5	0	0	1,25	17,5	1980	97,85	4,35
6	1	0	1,75	16,65	1700	94,2	4,99
7	0	1	1,25	16,65	1760	97,38	4,43
8	0	1	1,75	15,8	1880	94,75	7,58
9	1	1	1,5	17,5	1730	98,0	2,38

Табл. 38. Матрица плана в натуральном и кодированном масштабах

Детали типа стаканов, изготовленные из формованных и спеченных порошковых заготовок холодной закрытой прошивкой с активно направленными напряжениями контактного трения, приведены на рис. 4.16.

В предыдущем исследовании влияние факторов описано математическими моделями (79)–(81), в которых отсутствуют члены, характеризующие совместное влияние (взаимодействие) факторов. Такие члены показывают, что



Рис. 4.16. Стаканы, изготовленные ХОШ из спеченных порошковых заготовок

влияние какого-то из факторов зависит от того, какие значения при этом принимают взаимодействующие факторы. Ценность многофакторных экспериментов, при которых от опыта к опыту факторы изменяются в соответствии с планом эксперимента, заключается в возможности оценки совместного влияния факторов. При построении моделей, содержащих члены, описывающие совместное влияние факторов, создаются лучшие условия для оптимизации технологического процесса. Такие модели построены в результате описанного ниже исследования, и с их применением проведена оптимизация закрытой прошивки (обратного выдавливания) спеченной порошковой заготовки. Исследовано влияние отношения радиуса матрицы R к радиусу пуансона, исходной плотности  $\gamma_0$ спеченных заготовок, отношения длины заготовки к ее диаметру L, относительной скорости перемещения матрицы  $v_{\rm M} = \hat{v}_{\rm M}/\hat{v}_{\rm H}$ , где  $\hat{v}_{\rm M}$  – фактическая скорость перемещения матрицы,  $\hat{v}_{\rm H}$  наибольшая скорость течения материала заготовки. В случае положительного значения фактора  $v_{\rm M}$  скорости матрицы и пуансона совпадают по направлению. Условие смазывания, дисперсность порошка и другие технологические параметры находились на их постоянных уровнях.

Зависимыми переменными являлись удельная сила q [МПа] на пуансоне, выполняющем закрытую прошивку заготовки, средняя плотность изготовленных стаканов  $\gamma$  [г/см<sup>3</sup>], неравномерность распределения плотности по высоте стаканов  $\Delta \gamma$  [%].

Уровни варьирования факторов в эксперименте были заданы следующими. Фактор  $R(X_1)$  принимал значения 1,75; 1,5; 1,25, в соответствии с размерами применяемых в практике деталей. Фактору  $\gamma_0(X_2)$  присвоены значения 5,7; 6,2; 6,7 (г/см<sup>3</sup>) в соответствии с плотностями заготовок, применяемыми на практике. Уровни варьирования фактора  $L(X_3)$ : 1,5; 2,0; 2,5.

За средний уровень фактора  $v_{_{\rm M}}(X_4)$  принято его значение, равное 0. Крайние уровни определены из условия, что для получения качественной поверхности изделия скорость матрицы в направлении течения материала заготовки не должна превышать скорость течения. Принято, что этот уровень равен +1. Симметрично противоположный ему уровень равен – 1.

В результате эксперимента получены следующие модели для закрытой прошивки спеченных заготовок из порошка ПЖВ2.160.28:

$$q [M\Pi a] = 2124,6 - 90x_{1} + 100x_{2} - 10x_{3} + 35x_{1}x_{3} - 20x_{2}x_{3} - 28,1x_{1}^{2} - 67,9x_{2}^{2} + 172,1x_{3}^{2} + 2,1x_{4}^{2};$$
  

$$\gamma [r/cm^{3}] = 7,505 - 0,115x_{1} + 0,185x_{2} - 0,19x_{3} + 0,048x_{1}x_{2} + 0,0075x_{1}x_{3} - 0,041x_{1}x_{4} + 0,032x_{2}x_{3} - 0,084x_{3}x_{4} - 0,046x_{1}^{2} + 0,0043x_{2}^{2} - 0,021x_{3}^{2} - 0,011x_{4}^{2};$$
(82)

$$\Delta\gamma [\%] = 4,8 + 1,2x_1 - 0,05x_2 + 2,3x_3 - 0,625x_1x_2 - 0,675x_1x_3 + 0,175x_2x_3 + 0,519x_1^2 + 0,119x_2^2 - 0,18x_3^2 + 0,119x_4^2,$$

где *x<sub>i</sub>* – значения факторов в кодированном масштабе, связанные со значениями факторов в натуральном масштабе следующими соотношениями:

$$x_1 = X_1; x_2 = (X_2 - 6, 2)/0, 5; x_3 = (X_3 - 1, 5)/0, 25; x_4 = (X_4 - 2)/0, 5.$$
 (83)

Анализ полученных моделей показал, что q,  $\gamma$  и  $\Delta \gamma$  не зависят от фактора  $x_4$ , т.е. относительной длины заготовки. Во всех моделях сильно выражено совместное влияние факторов, поскольку коэффициенты  $b_{ij}$  перед произведениями факторов по абсолютной величине соизмеримы с другими коэффициентами.

В целом, использование активно направленных напряжений контактного трения, содействующих уплотнению материала заготовки, позволяет уменьшить неравномерность распределения плотности по высоте изготавливаемого стакана в 2 ... 5 раз и повысить среднюю плотность стакана на 3 ... 6% по сравнению с закрытой прошивкой в неподвижной матрице, что способствует повышению качества деталей и коэффициента использования материала. Использование активно направленных напряжений контактного трения, способствующих истечению материала в стенку стакана, позволяет снизить удельную силу на пуансоне на 7 ... 13%.

Выявление наилучших параметров процесса состоит в определении значений факторов, которые обеспечивают заданную плотность (например, не менее 7,65 г/см3) и неравномерность распределения плотности по высоте детали (например, 3%) при ограничении удельной деформирующей заготовку силы (например, не более 1900 МПа).

Для детали с размерами R = 1,25 и L = 2 модели для ХОШ спеченных порошковых заготовок имеют следующий вид:

$$q = 2306,7 - 125 x_{1} + 120 x_{2} - 28,1 x_{1}^{2} - 679 x_{2}^{2},$$
  

$$\gamma = 7,674 - 0,126 x_{1} + 0,153 x_{2} + 0,048 x_{1}x_{2} - 0,046 x_{1}^{2} + 0,0043 x_{2}^{2}, \quad (84)$$
  

$$\Delta \gamma = 2,32 + 1,875 x_{1} - 0,825 x_{2} - 0,625 x_{1}x_{2} + 0,519 x_{1}^{2} + 0,119 x_{2}^{2}.$$

Два фактора из четырех в этих моделях для заданного в каждом конкретном случае чертежа детали являются фиксированными (размеры R и L). Поскольку остаются только два варьируемых фактора ( $\gamma_0$  и  $v_{_{\rm M}}$ ), удобно использовать графический способ анализа.

Выявление наилучших параметров проводится на основании построенных в плоскости  $\gamma_0 - v_{_{\rm M}}$  изолиний (рис. 4.17) равных значений величин  $q, \gamma$ и  $\Delta \gamma$ , определенных по приведенным выше моделям (для R = 1,25 и L = 2). На рис. 4.17 наилучшая область заштрихована. Сочетание факторов  $\gamma_0$  и  $v_{_{\rm M}}$ , лежащих в этой области, является наилучшим.

Эффект снижения удельной силы на пуансоне при ХОШ закрытой прошивкой с активно направленными напряжениями контактного трения спеченных порошковых заготовок может быть увеличен, если на специализированном прессе, имеющем привод подвижной матрицы, реализовать схему, приведенную на рис. 4.18. В этой схеме сочетают способ снижения удельной силы путем применения компенсационных полостей в матрице и способ закрытой прошивки с активно направленными напряжениями контактного трения.



Рис. 4.17. Номограмма для определения наилучших параметров процесса холодной закрытой прошивки спеченных порошковых заготовок в подвижной матрице



Рис. 4.18. Схема закрытой прошивки заготовки в матрице с открывающейся компенсационной полостью

Штампуют стакан со ступенчатой внешней поверхностью из заготовки, имеющий внешний диаметр 2R, пуансоном с диаметром 2r. Матрица в исходном положении опирается на нижний пуансон, и диаметр полости, в которую укладывают заготовку, равен 2R. По мере внедрения верхнего пуансона в заготовку матрицу перемещают вверх со скоростью  $v_{\rm M}$ . При этом на внешней поверхности заготовки действуют активно направленные напряжения контактного трения, а на уровне ступени матрицы непрерывно открывается компенсационная полость, уменьшающая гидростатическое давление в заготовке и снижающая удельную силу на пуансоне.

# 4.3. Штамповка высокоплотных цилиндрических порошковых заготовок на этапе, предшествующем их спеканию

Анализ результатов разработанных с участием авторов данной монографии и описанных в п. 4.2 технологических процессов формования цилиндрических порошковых заготовок, их спекания и производства из них с помощью ХОШ деталей типа стаканов показал, что такие процессы позволяют изготавливать детали из низколегированных порошковых шихт на железной основе. При увеличении легирования материала спеченной заготовки для ее ХОШ требуется создание удельной деформирующей заготовку силы большой величины. При такой величине удельной силы сопротивление пуансона усталости (см. рис. 1.2) становится недостаточным для экономической целесообразности применения процесса. При применении низколегированных порошковых шихт прочность изготавливаемых деталей может не удовлетворить предъявляемым требованиям.

При обработке давлением порошковых композиций до проведения их спекания сосредотачивают внимание на следующих их характеристиках.

Уплотняемость металлического порошка – его способность уменьшить занимаемый объем под воздействием давления. Эта характеристика оценивается по плотности образцов, изготовленных в цилиндрической матрице при давлениях 400, 500, 600, 700 и 800 МПа. Отметим недостаток этого технологического свойства, поскольку рассматривается только способность уменьшать объем под действием давления осевого сжатия, т.е. предполагается, что частицы порошка уплотняются без изменения первоначальной их формы только вследствие уменьшения пустот между ними. В тоже время, специалисты по обработке металлов давлением имеют возможность создавать такие схемы деформирования засыпанной в матрицу порции порошка, при которых частицы принимают лепешкообразную или нитеобразную формы для порошков с различными исходными формами частиц. Таким образом, технологическая наследственность [31], связанная с методом получения железного порошка, может быть исправлена.

Размер частиц большинства промышленных порошков находится в пределах от десятых долей микрона до десятых долей миллиметра и определяется методом и режимом производства. Так, например, при механическом измельчении размер частиц уменьшается с увеличением длительности размола, при распылении сжатым воздухом – с увеличением его давления.

Подготовка шихты перед формованием ставит своей задачей получение порошков с определенным химическим составом и физическими свойствами. Для разделения порошков на фракции (по размеру частиц) крупнее 50 мкм применяют просеивание через шелковые или металлические сита; для выделения более тонких фракций используют воздушную сепарацию.

Металлические сита изготавливают из сеток, сплетенных из латунной или бронзовой проволоки. Ситовые полотна различаются по размеру отверстий и толщине проволочек, из которых они выполнены.

Сита могут быть подвесными или смонтированными на металлической раме. В зависимости от способа сообщения вибраций различают инерционные, ударные, качающиеся и электромагнитные сита. Сита с помощью шлангов или сильфонов простыми и надежными уплотнителями могут быть соединены с приемными устройствами. Это позволяет полностью герметизировать процесс просева или используется в случае необходимости просева под давлением, в вакууме, в среде защитных газов.

Измельчение стеарата цинка, применяемого в качестве смазочного материала, осуществляется на протирочном сите, в котором порошок через сито продвигается протиром.

Далее следует перемешивание порошков, которое осуществляется преимущественно в смесителях периодического действия сухим способом. Механическое перемешивание осуществляется в барабанах, конусных смесителях, шнековых, шаровых и вибромашинах, которые заполняют порошками обычно на 1/2 ... 1/3 объема. Скорость вращения смесителя обычно равна 30 ... 60 об/мин. Длительность перемешивания – от 10 ... 15 мин до 2 ... 3 ч.

Поскольку каждый из смесителей периодического действия имеет ограниченный объем, каждая из перемешанных в них порций порошковой шихты немного отличается от других. Поэтому, чтобы на протяжении одной или нескольких рабочих смен шихта была неизменной, применяют усреднение шихты. Для этого порции шихты из смесителей засыпают в усреднитель. В усреднителе шихта движется по бункеру подобно потоку, без перемещения частиц относительно друг друга. Перемешивание осуществляется за счет неравномерности движения частиц по сечению бункера. Если выгружаемый из нижнего отверстия материал снова возвращается в бункер, то после нескольких подобных проходов он может быть достаточно хорошо перемешан. Такой принцип перемешивания используется в пересыпных бункерах усреднителей, которые нашли применение в практике подготовки шихты на основе железных порошков.

Для производства высокоплотных заготовок деталей, в частности, из легированных и сложнолегированных порошковых сталей, авторами данной монографии разработаны схемы ХОШ непосредственно порошковых шихт, до их спекания. При применении таких схем остаточная пористость деталей, ограничивающая возможность их последующей термической обработки, снижается созданием в уплотняемом материале существенных сдвигов между частицами, препятствующих образованию пор (см. п. 1.4). Ранее, отличные от схем авторов данной монографии, но использующие существенные сдвиги между частицами материала, схемы были предложены в работах [33, 34].

Авторы данной монографии, в частности, используют следующие схемы уплотнения порошковой шихты, в которых реализуются интенсивные сдвиги между частицами, рис. 4.19 [1, 3, 5, 31].

Первая (I) схема деформирования включает формование брикета движением пуансона со скоростью vп с одновременным послойным увеличением его диаметра при перемещении из верхней цилиндри¬ческой полости матрицы, имеющей меньший диаметр, в нижнюю цилиндрическую полость, имеющую больший диаметр (рис. 4.19, *a*). Указанное перемещение осуществляется движением матрицы в направлении стрелки  $v_{\rm M}$ . При этом осуществляется послойное радиальное выдавливание брикета.

Вторая (II) – те же операции, что и I, а затем, при сохранении давления  $p_n$  на торце формуемой заготовки, выдавливание брикета из полости матрицы большего диаметра в полость меньшего диаметра, осуществляемое перемещением матрицы (рис. 4.19,  $\delta$ ) в направлении стрелки  $v_n$ .

Изменение формы заготовки при обработке давлением всегда сопряжено со сдвигами в заготовке. Сдвиги создаются как при формовании порошка с использованием приведенной I схемы его уплотнения, так и с использованием II схемы.



Рис. 4.19. Схемы формования порошковой заготовки осевым сжатием с созданием сдвигов слоев материала

В предложенных схемах формования с интенсивными сдвигами частиц материала удельные силы  $p_1$  и  $p_2$ , приложенные к торцу формуемой заготовки, следующие. Удельные силы определяются как силы деформирования брикета, деленные на площадь поперечного сечения пуансона.

При I схеме:  $p_1 = 850 \dots 900$  МПа; при II схеме:  $p_2 = 300 \dots 350$  МПа. Выигрыш в снижении удельной силы у II схемы по сравнению с I составляет 2,6 … 2,8 раза.

Формование по описанным схемам осуществляется на прессах, конструкции которых рассмотрены ниже, в разделе 5. При формовании по описанным схемам достигается средняя плотность формованных деталей, составляющая 90% и более.

Послойное радиальное выдавливание брикета, реализуемое с использованием I схемы его уплотнения, поясняется рис. 4.20. По мере перемещения матрицы вверх со скоростью vм непрерывно образуется полость A, в которую под действием силы P происходит радиальное выдавливание деформируемого материала заготовки, имевшей радиус  $R_1$ .



Рис. 4.20. Схема заполнения матрицы при послойном увеличении диаметра заготовки

При правильно выбранной скорости  $v_{_{\rm M}}$  радиально выдавливаемый материал заготовки полностью заполняет полость A, и высота фланца  $h_{_{\rm \phi}}$ постоянно возрастает. Так непрерывно происходит до тех пор, пока  $h_{_{\rm \phi}}$  не сравняется с  $h_{_{\rm дет}}$ . Осевая полость на схеме имитирует наличие пористости в порошковой детали. При перемещении матрицы пористость под действием силы P на уровне верхнего торца фланца уменьшается, что отражается уменьшением по мере движения матрицы вверх диаметра имитирующей пористость осевой полости.

Отличие схемы, показанной на рис. 4.20, от схемы на рис. 4.18 состоит в том, что на рис. 4.18 пуансон с радиусом *r* производит закрытую прошивку полости в заготовке. Заготовка спеченная, т.е. в ней уже произошли этапы взаимной диффузии частиц, изображенные выше на рис. 4.3. Спеченная заготовка представляет собой твердое тело, имеющее остаточную пористость. Перемещение матрицы навстречу пуансону, при котором открывается компенсационная полость под ступенью в матрице, производится с целью уменьшения гидростатического давления (всестороннего равномерного сжатия) в заготовке, чтобы снизить удельную силу прошивки осевой полости и таким образом повысить сопротивление пуансона усталости. На рис. 4.20 фактическая осевая полость в заготовке отсутствует. Она изображена схематично, чтобы отразить наличие в заготовке пористости, при этом общий объем всех пор как бы суммирован в виде этой осевой полости.

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

На рис. 4.19 были приведены схемы двух операций деформирования порошковой заготовки, описанные в комментарии к этому рисунку. В каждой из этих операций деформирования создаются сдвиги частиц порошковой шихты, из которой состоит заготовка, и вследствие давления на торцы заготовки уменьшается пористость заготовки.

Количество чередований двух операций, показанных на рис. 4.19, может быть неограниченно увеличено (оно лимитируется только сопротивлением штамповой оснастки усталости и силой пресса). При этом могут быть созданы степени деформации порошковой шихты, рассчитываемые по разработанной авторами данной монографии [35–38], не приведенной здесь методике, при которых формуемый порошок может быть измельчен до наноразмерного состояния [39, 40].

При формовании заготовок в соответствии с рис. 4.19 исследовано влияние марки порошка, удельной силы, действующей на торец заготовки, механической схемы деформирования, количества стеарата цинка в шихте на плотность формованных образцов. Напомним, что порошок стеарата цинка используется в качестве смазочного материала при формовании заготовок из порошков на железной основе.

В эксперименте применены порошки ПЖВ2.160.28, ПЖРВ2.200.26, ПЖРВ3.200.26, ПЖВ4.160.28 (ГОСТ 9849-86), WPL-200, ULTRAPAC-LE (Mannesmann Demag) [5, 41]. Удельная сила, приложенная к торцу засыпанной порции порошка, в конце формования составляла 300, 340, 380, 420 МПа. Исследованы две механические схемы деформирования (см. рис. 4.19): І – формование образца при одновременном его послойном радиальном выдавливании из полости матрицы с Ø32 мм в полость с Ø36; II – те же операции, что и в I, а затем прямое выдавливание образца из полости матрицы с Ø36 в полость с Ø32 при сохранении давления на его торцы. Стеарат цинка в шихту добавляли в количестве 0,5% и 1%.

В проведенном исследовании рассмотренным порошкам присвоены условные значения уровней: 0, 1, 2, 3, 4, 5 в соответствии с порядком, в котором они были записаны выше. Механическим схемам деформирования присвоены условные значения уровней 0 (I схема) и 1 (II схема).

С применением исследуемых схем проведены 24 опыта по формованию заготовок в соответствии с планом эксперимента, приведенным в табл. 39. У формованных заготовок определены плотности у.

Строилась модель следующего вида:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i X_i + \sum_{i=1}^2 b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 b_{iii} X_i^3 + b_{1111} X_1^4 + b_{11111} X_1^5, \quad (85)$$

где индекс *i* обозначает номер фактора,  $X_i$  – значение фактора в натуральном масштабе,  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ii}$ ,  $b_{iii}$ ,  $b_{1111}$ ,  $b_{1111}$  – коэффициенты математической модели, соответственно, перед свободным членом и факторами, входящими в модель линейно, квадратично, кубически, в четвертой и пятой степенях.
Номер опыта	Марка порошка	Удельная сила формования, МПа	Схема формования	Содержание стеарата цинка, %
1	2	3	4	5
1	ПЖВ2.160.28	300	0	0,5
2	ПЖРВ2.200.26	340	0	1
3	ПЖРВ2.200.26	380	0	0,5
4	ПЖВ2.160.28	420	0	1
5	ПЖРВ2.200.26	420	1	0,5
6	ПЖВ2.160.28	380	1	1
7	ПЖВ2.160.28	340	1	0,5
8	ПЖРВ2.200.26	300	1	1
9	ПЖРВ3.200.26	300	0	0,5
10	ПЖВ4.160.28	340	0	1
11	ПЖВ4.160.28	380	0	0,5
12	ПЖРВ3.200.26	420	0	1
13	ПЖВ4.160.28	420	1	0,5
14	ПЖРВ3.200.26	380	1	1
15	ПЖРВ3.200.26	340	1	0,5
16	ПЖВ4.160.28	300	1	1
17	WPL-200	300	0	0,5
18	ULTRAPAC-LE	340	0	1
19	ULTRAPAC-LE	380	0	0,5
20	WPL-200	420	0	1
21	ULTRAPAC-LE	420	1	0,5
22	WPL-200	380	1	1
23	WPL-200	340	1	0,5
24	ULTRAPAC-LE	300	1	1

Табл. 39. План эксперимента в натуральном масштабе

Измеренные плотности заготовок в соответствии с номерами опытов, соответствующих номерам в табл. 39, приведены в табл. 40.

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Шлиф на неспеченной заготовке, изготовленной в 6-м опыте (см. табл. 39), выполненный для последующих исследований ее структуры, приведен на рис. 4.21.

На основании результатов опытов рассчитаны коэффициенты математической модели (85), проведен статистический анализ математической модели, из нее исключены члены с коэффициентами, значимость которых не подтвердилась.

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
γ [г/см <sup>3</sup> ]	5,7	5,77	5,8	6,4	7,15	7,25	7,05	6,9
№ опыта	9	10	11	12	13	14	15	16
γ [г/см <sup>3</sup> ]	5,8	5,65	5,65	6,34	6,5	7,15	6,75	6,4
№ опыта	17	18	19	20	21	22	23	24
γ [г/см <sup>3</sup> ]	5,65	6,0	6,05	6,2	7,15	7,3	7,05	7,15

Табл. 40. Результаты измерений плотности деталей



Рис. 4.21. Заготовка, формованная из порошка ПЖВ2.160.28, фрезерованная и шлифованная до ее спекания

В результате получена модель, описанная следующим уравнением:

$$\gamma [r/cm^{3}] = 4,7 - 2,38 X_{1} + 0,031 X_{2} + 1,066 X_{3} + 0,368 X_{4} + 3,95 X_{1}^{2} - 2,303 X_{1}^{3} + 0,5447 X_{1}^{4} - 0,04455 X_{1}^{5}.$$
(86)

С использованием математической модели (86) построен график достигаемых плотностей в зависимости от значений факторов в описанном эксперименте, рис. 4.22. Таким образом, наибольшую плотность при остальных равных условиях позволяет достичь применение порошка ULTRAPAC-LE, наименьшую – применение порошка ПЖВ4.160.28.

Анализ модели показывает также, что сила на торце порошковой заготовки (фактор  $X_2$ ) влияет линейно на ее плотность. Наибольшее влияние на плотность заготовки оказывает схема ее формования, в соответствии с рис. 4.19. Влияние на плотность содержания стеарата цинка в шихте значительное, примерно такое же, как влияние удельной силы, приложенной к торцу заготовки.

Аналогично построена модель зависимости твердости заготовки по Бринеллю от исследованных факторов. Значения твердости для каждого опыта приведены в табл. 41.



Рис. 4.22. Достигаемые плотности заготовки в зависимости от удельной силы на торце пуансона перед началом создания сдвигов при 1%-м содержании стеарата цинка для следующих марок железных порошков: *I* – ULTRAPAC-LE ; *2* – WPL-200; *3* – ПЖВ2.160.28;

4-ПЖРВ2.200.26; 5-ПЖРВ3.200.26; 6-ПЖВ4.160.28

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
НВ	36,1	47,4	46,5	50,4	67,8	71,6	54,5	53,8
Номер опыта	9	10	11	12	13	14	15	16
НВ	34,6	30,2	31	43,2	45,5	47,8	47,1	33,4
Номер опыта	17	18	19	20	21	22	23	24
НВ	46,7	82,3	85,6	45	116	68,2	59,1	88,4

Табл. 41. Результаты измерений твердости деталей в соответствии с номерами опытов

Для твердости заготовки получено следующее уравнение:

$$HB = 271,3 - 0,486 X_1 - 2,24 X_2 + 14,52 X_3 + 11,06 X_1^2 + + 0,0069 X_2^2 - 13,65 X_1^3 - 0,0000066 X_2^3 + 4,26 X_1^4 - 0,38 X_1^5.$$
(87)

Полученное уравнение показывает, что содержание в шихте стеарата цинка не влияет на твердость детали, поскольку значимость коэффициента перед  $X_4$  не подтвердилась.

В работе [5] установлена следующая зависимость между твердостью спеченной порошковой детали и ее прочностью:

$$\sigma_{\rm B} = 5,449 \ HB - 192,7. \tag{88}$$

Для порошков WPL-200 и ULTRAPAC-LE эти зависимости приведены в проспекте фирмы Mannesmann Demag [41].

С использованием этих зависимостей по величине твердости заготовки в каждом из опытов была определена ее прочность. Результаты приведены в табл. 42.

Для каждого опыта в табл. 42 приведены два значения прочности, поскольку в каждом опыте были изготовлены по два образца.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
σ <sub>в</sub> [ΜΠa]	65	77	94	121	211	223	193	168
	59	71	85	119	197	213	187	164
Номер опыта	9	10	11	12	13	14	15	16
σ <sub>в</sub> [МПа]	52	42	52	109	171	196	165	117
	48	36	46	103	175	188	161	107
Номер опыта	17	18	19	20	21	22	23	24
σ <sub>в</sub> [МПа]	69	202	214	128	390	227	199	332
	63	186	206	126	366	223	197	320

Табл. 42. Прочности деталей для каждого из опытов, указанных в матрице плана эксперимента

После расчета коэффициентов получена следующая модель:

$$\sigma_{_{B}}[M\Pi a] = 115,31 - 138,31X_{1} - 94,74X_{2} + 112,83X_{3} + 12X_{4} + 236,75X_{1}^{2} + 0,0264X_{2}^{2} - 144,1545X_{1}^{3} - 0,000023X_{2}^{3} + 34,45X_{1}^{4} - 2,754X_{1}^{5}.$$
(89)

Для выявления влияния типа порошка на прочность детали для присвоенных порошкам условных значений уровней было рассчитано выражение

$$B = -138,31X_1 + 236,75X_1^2 - 144,1545X_1^3 + 34,45X_1^4 - 2,754X_1^5$$

Результаты расчета приведены в табл. 43.

Марка порошка	ПЖВ2.16 ПЖ	б0.28 П PB2.200.20	ЖРВ3.200 5 ПЖ	.26 WF B4.160.28	L-200 ULTR	200 ULTRAPAC-LE		
Значение $F_1 = X_1$	0	1	2	3	4	5		
В	0	- 14	- 19,9	- 55,5	+ 6,64	+ 129,45		

Табл. 43. Влияние марки порошка на прочность заготовки

Таким образом, наибольшая прочность при остальных равных условиях достигается на порошке ULTRAPAC-LE, наименьшая – на порошке ПЖВ4.160.28.

На рис. 4.23 приведены графики зависимости плотности, твердости и прочности после спекания для заготовки, формованной по схеме, показанной на рис. 4.19, а. Графики построены в зависимости от удельных сил, действующих на заготовку в начале ее деформирования с большего диаметра на меньший при 1%-ном содержании стеарата цинка в шихте.



Рис. 4.23. Зависимости плотности у, твердости НВ и прочности (после спекания) заготовок от удельных сил в начале деформирования заготовок, формуемых по схеме, показанной на рис. 4.19, *a*: *1* – порошок ULTRAPAC-LE; *2* – порошок WPL-200; *3* – ПЖВ2.160.28; *4* – ПЖРВ2.200.26; *5* – ПЖРВ3.200.26; *6* – ПЖВ4.160.28

На рис. 4.23 видно, что твердость и прочность заготовок наиболее зависят от марки порошка: порошок ULTRAPAC-LE имеет существенное преимущество перед нелегированными порошками. В тоже время, как следует из модели (86), схема формования тоже вносит существенный вклад.

При одинаковых силах формования и режимах спекания наилучшей уплотняемостью обладает порошок ULTRAPAC-LE, относительная плотность образцов из которого выше относительной плотности образцов из порошков ПЖВ2.160.28 и WPL-200. Плотность последних, соответственно, на 6 ... 7% и на 2 ... 3% выше плотности образцов из порошков ПЖВ4.160.28 и распыленных водой порошков ПЖРВ2.200.26 и ПЖРВ3.200.26.

Прочность образцов из порошка ULTRAPAC-LE, соответственно, в 2 ... 2,4 раза и в 1,5 ... 1,7 раза выше прочности образцов из ПЖВ4.160.28 и ПЖВ2.160.28. Образцы из порошка ПЖВ2.160.28 незначительно уступают по прочности образцам из WPL-200, и их прочность превышает на 6 ... 10% прочность образцов из ПЖРВ2.200.26 и ПЖРВ3.200.26.

Проведенные исследования показали, что независимо от марки порошка для достижения высоких плотности, твердости и прочности заготовок деталей целесообразно применять механические схемы уплотнения порошковой шихты, предусматривающие большие сдвиги между частицами, при этом плотность заготовок повышается в среднем на 10 ... 12%, а прочность – примерно в 2 раза.

Кривые, приведенные на рис. 4.23, позволяют провести пересчет результатов проведенных исследований по формованию порошковых деталей на другие марки железных порошков.

В частности, ниже, в п. 4.7, на рис. 4.51 и 4.52, приведены данные по распределению плотности и прочности для втулок, изготовленных формованием из порошков ПЖВ2.160.28 и ПЖВ4.160.28. На рис. 4.51 плотности деталей из ПЖВ2.160.28 на 0,45 г/см<sup>3</sup> выше, чем у деталей из ПЖВ4.160.28. Соответственно, прочности (рис. 4.52) различаются на 50 МПа. На рис. 4.23 для деталей из этих же порошков плотности и прочности различаются на 0,45 г/см<sup>3</sup> и на 55 МПа. Следовательно, в описанном ниже в п. 4.7 исследовании по формованию втулок с конической внешней поверхностью можно было применить порошок только одной марки, а для другой марки результаты пересчитать с использованием графиков на рис. 4.23. Можно также рассчитать плотности и прочности втулок с конической внешней поверхностью для вариантов их изготовления из порошков ПЖРВ2.200.26, ПЖРВ3.200.26, WPL-200 и ULTRAPAC-LE.

Важным выводом из рассмотрения графиков на рис. 4.23 является постоянство расстояний между кривыми и углов наклона касательных к ним вне зависимости от удельной силы формования, толщины стенки и угла конусности втулки. Следовательно, изменение плотности, твердости и прочности порошковой заготовки, связанное с заменой марки порошка, не зависит от формы детали и силы формования.

## 4.4. Контроль качества высокоплотных неспеченных порошковых заготовок

При использовании способа формования, показанного на рис. 4.19, высокая плотность неспеченных образцов позволяет осуществлять контроль качества изготовленных заготовок до проведения дорогостоящего их спекания с применением восстановительных сред и методических печей. Разработанные авторами данной монографии способы контроля описаны ниже.

Для испытания на сдвиговую прочность штампованных заготовок разработано устройство, схема которого приведена на рис. 4.24.



**Рис. 4.24.** Схема устройства для испытания образцов на сдвиговую прочность ( $\tau_{en}$ ): *I* – образец; *2* – нож; *3* – пуансон

Были изготовлены два устройства для определения напряжения разрушения при срезе  $\tau_{cp}$ , отличающихся друг от друга только диаметрами ножей для разрезки цилиндрических заготовок: получаемых при реализации I схемы формования, с диаметром d = 36 мм, и при реализации II схемы формования, с диаметром d = 32 мм. Фотографии штампов приведены на рис. 4.25. В приведенных штампах на цилиндрическую заготовку передается сила, направленная перпендикулярно ее боковой поверхности.

Измерения проводились на испытательной машине фирмы Инстрон-350 следующим образом: штамп с заготовкой устанавливался на неподвижную плиту испытательной машины, верхняя плита опускалась, через нее передавалась сила на нож, и заготовка разрезалась по двум сечениям (см. рис. 4.24). При этом пишущим устройством машины фиксировалась сила среза.

Величина касательного напряжения на поверхности среза  $\tau_{cp}$ , Па, определялась по формуле:  $\tau_{cp} = \frac{F}{2S}$ , где: F – фиксируемая сила (максимальная), H; 2S – суммарная площадь среза образца по двум поверхностям,  $M^2$ .



**Рис. 4.25.** Общий вид штампов для испытания образцов на сдвиговую прочность ( $\tau_{rn}$ )

Помимо влияния схемы уплотнения на прочность формованного порошкового образца оценивалось влияние на эту прочность магнитно-импульсной обработки (МИО) порошка, предшествующей его уплотнению, а также МИО уже формованного образца. МИО проводилась по схеме, показанной на рис. 4.7, и преследовала ту же цель – повышение плотности заготовок. Напряженность поля 10 6 А/м, а длительность обработки 0,8 мс.

Факторам в эксперименте были присвоены следующие обозначения: схема формования –  $X_1$ ; наличие МИО порошка –  $X_2$ ; наличие МИО заготовки –  $X_3$ ; содержание стеарата цинка в шихте, % –  $X_4$ ; содержание углерода в шихте, % –  $X_5$ .

Значение фактора  $X_1 = 0$  было присвоено I схеме формования (см. комментарий к рис. 4.19),  $X_1 = 1 - II$  схеме; при наличии МИО порошка  $X_2 = 0$ , при отсутствии –  $X_2 = 0$ ; при наличии МИО заготовки  $X_3 = 0$ , при отсутствии –  $X_3 = 1$ . Нижним уровнем содержания (по массе) стеарата цинка в шихте являлось значение  $X_4 = 1\%$ , верхним уровнем –  $X_4 = 0.5\%$ , нижним уровнем содержания (по массе) углерода в шихте являлось значение  $X_5 = 0\%$ , верхним уровнем –  $X_5 = 1\%$ .

Полученные в результатах проведенных опытов значения  $\tau_{cp}$  изменялись от 13,2 МПа до 30 МПа, см. ниже табл. 44.

В результате проведенного исследования величина тср была описана уравнением следующего вида:

$$\tau_{cp} = 14,38 + 12,78X_1 - 0,38X_2 + 2,12X_3 + 2,84X_4 - 4,7X_5.$$
(90)

Анализ полученной модели позволил сделать следующее заключение.

Установлено сильное влияние на прочность образца схемы формования  $(X_1)$ . Так, при средней величине тср, равной 22,36 МПа, схема формования изменяет это напряжение на 12,78 МПа: от 15,25 МПа до 28,03 МПа. Таким образом,  $\tau_{cp}$  увеличивается при II схеме формования, осуществляющей более интенсивное действие сдвигов в материале формуемого образца, в 1,84 раза по сравнению с I схемой.

МИО порошка приводит к снижению тср формованного образца, как при применении I схемы формования, так и при применении II схемы. Это снижение  $\tau_{cp}$  объясняются тем, что МИО выравнивает остаточные напряжения в образце до некоторого среднего значения. В тоже время, МИО уже сформованного образца увеличивает его тср вне зависимости от схемы формования.

Как при I, так и при II схемах формования,  $\tau_{cp}$  выше при большем содержании пластификатора (стеарата цинка), выполняющего роль смазки. Это объясняется тем, что смазка способствует снижению трения между частицами и позволяет достичь при формовании большей плотности образца.

Увеличение количества углерода в шихте оказало противоположное действие по сравнению с увеличением количества пластификатора. Это можно объяснить тем, что имеющий пластинчатую структуру порошок углерода, распределенный между зернами железного порошка, способствует началу скольжения зерен порошка друг относительно друга при разрушении образца под действием сдвигающих напряжений.

Заметим, что описанные выше влияния содержания в шихте стеарата цинка и углерода характерны только при испытаниях образцов, не подвергнутых спеканию. В процессе спекания стеарат цинка выгорает, а углерод взаимодействует с частицами железного порошка, осуществляя его легирование.

В описанном далее экспериментальном исследовании высокая плотность заготовок, сформованных по способу уплотнения, показанному на рис. 4.19, позволила до проведения операции спекания изготовить из них шлифы для металлографического исследования. Для этого сформованные заготовки были фрезерованы до меридионального сечения торцевой фрезой без выкрашивания поверхности. Затем по стандартной технологии были приготовлены шлифы по всей поверхности меридионального сечения заготовок. После полирования поверхности шлифов они были обработаны 5% раствором азотной кислоты в спирте до выявления микроструктуры феррита.

Рассмотрение шлифов на микроскопе позволило наблюдать, что частицы порошка в области боковой поверхности заготовки имеют текстуру преимущественной ориентировки. На рисунке 4.26 показана наблюдаемая в микроскоп картина. Для характеристики наблюдаемой картины в качестве зависимой переменной использован указанный на рис. 4.26 угол укладки зерен β.

При описании угла  $\beta$  уравнением модели расположение рассматриваемой в микроскоп области на плоскости меридионального сечения заготовки определяется факторами  $X_1$  и  $X_2$ . Фактор  $X_1$  – относительная (по отношению к радиусу боковой поверхности заготовки) координата центра рассматриваемой области в радиальном направлении, фактор  $X_2$  – относительная (по отношению к радиусу боковой поверхности заготовки) координата этой области в осевом направлении. Центр координат находится в центре плоскости меридионального сечения заготовки. Влияние схемы формования (см. рис. 4.19) оценено фактором  $X_3$ . Значение  $X_3 = 0$  присвоено I схеме формования, значение  $X_3 = 1 - \text{II}$  схеме формования.



Рис. 4.26. Схематическое изображение укладки частиц порошка

Учтено влияние на ориентировку зерен МИО порошка и МИО формованной заготовки. В порошке МИО вызывает напряжения и деформации магнитострикционного происхождения. Для частиц и оксидных пленок на их поверхности магнитострикционные деформации могут иметь различные величины и направления, что приводит к растрескиванию и отслаиванию оксидов. В исследованиях проводились как МИО порошка до его засыпки в штамп для формования, так и МИО уже формованных заготовок. При отсутствии МИО порошка фактор  $X_4 = 0$ , при наличии –  $X_4 = 1$ . При отсутствии МИО заготовки фактор  $X_5 = 0$ , при наличии –  $X_5 = 1$ .

Обработанная партия порошка выдерживалась 24 часа с целью более полного протекания процессов между частицами. Формованные заготовки обрабатывались с теми же режимами, что и порошок.

В проведенном экспериментальном исследовании плоскости меридионального сечения заготовки разбили на 9 областей, рис. 4.27. В соответствии с планом эксперимента, в этих областях на выполненных оператором зарисовках наблюдаемых в микроскоп картин распределения частиц порошка (см. рис. 4.26) проводили замеры величин угла β.

Строили математическую модель вида:

$$y_{\rm M}[{\rm гр}{\rm a}{\rm d}] = b_0 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_{22} + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5.$$
(91)

Для определения коэффициентов такой модели достаточно провести эксперимент, включающий в себя 9 опытов.

Замеры величин углов  $\beta$  были проведены не во всех 9 точках у заготовок, изготовленных по I схеме формования (рис. 4.27, *a*), и не во всех 9 точках у заготовок, изготовленных по II схеме формования (рис. 4.27, *б*). Точки, в которых проводились замеры, были определены матрицей плана эксперимента, которую авторы в данной монографии не приводят, чтобы не перегружать текст техническими моментами. На заготовке, изготовленной по I схеме формования, замеры углов  $\beta$  были проведены в точках 2, 3, 4, 6, 7, 8 (см. рис. 4.27, *a*), а на заготовке, изготовленной по II схеме формования, замеры углов  $\beta$  были проведены в точках 1, 5, 9 (см. рис. 4.27, *б*).



Рис. 4.27. Схема разбиения меридиональных сечений заготовок на области: а – для формования по I схеме, б – для формования по II схеме

Производили равномерное дублирование (*n* = 3) замеров в каждом из опытов. Усредненные результаты 3 замеров в каждом из опытов приведены в табл. 44.

№ п/п	Угол укладки зерен, β, град	Сдвиговая прочность т <sub>ср</sub> , МПа
1	34,14	26,8
2	37,68	19,2
3	40,1	17,7
4	39,8	18,9
5	33,5	13,8
6	32,5	28,9
7	27,7	13,2
8	39,0	18,0
9	33,17	30,0

Табл. 44. Значения угла укладки зерен и сдвиговой прочности заготовки

После реализации и обработки результатов эксперимента получена следующая математическая модель:

$$\beta = 0,629 - 18,18 X_1^2 + 21,67 X_2^2 + 63,79 X_1 - 8,183 X_2 - -1,77 X_3 - 1,527 X_4 + 0,414 X_5.$$
(92)

Анализ модели (92) показал следующее.

Величины угла укладки частиц порошка  $\beta$  распространяются на меридиональном сечении заготовки согласно кривой с минимальными значениями в центре заготовки до максимальных значений в боковых, пристеночных областях, доходящих до  $\beta = 35^\circ \pm 2^\circ$  для II схемы формования и  $\beta = 40^\circ \pm 2^\circ$ для I схемы формования (рис. 4.28). В боковых поверхностях эти значения  $\beta$ достигаются под действием контактных касательных напряжений при формовании заготовки (см. рис. 4.26).





Переход от I схемы формования ко II схеме не влияет на характер кривых, но значения углов β укладки частиц порошка меняются. Для II схемы формования они меньше на 4 ... 5° по сравнению с I схемой по всему меридиональному сечению формованной заготовки.

Применение МИО порошка приводит к заметному снижению значений углов β при обеих применяемых схемах формования (рис. 4.29). МИО порошка происходит на стадии подготовки к формованию, частицы не наклепаны, более податливы к процессам уплотнения и равномерной укладки.

Влияние МИО уже формованной заготовки со сложившейся картиной укладки частиц менее значительно, по сравнению с МИО порошка. Это влияние на величину угла укладки частиц β неоднозначное (рис. 4.30). На рис. 4.31 приведены графики, отражающие изменение угла укладки частиц порошка β в зависимости от местоположения поперечного слоя заготовки по ее высоте.



Рис. 4.29. Влияние МИО порошка на угол укладки частиц порошка β в области поперечного сечения заготовки на уровне половины ее высоты: 0--0 – I схема формования; ×--× – II схема формования; 0-0 – I схема формования с МИО порошка;

 $\times$ - $\times$  – II схема формования с МИО порошка; по оси R – значение фактора  $X_1$ 



Рис. 4.30. Влияние МИО заготовки на угол укладки частиц порошка β в области поперечного сечения заготовки на уровне половины ее высоты: 0--0 – I схема формования; ×--× – II схема формования; 0-0 – I схема формования с МИО заготовки; ×-× – II схема формования с МИО за¬готовки; по оси *R* – значение фактора *X*<sub>1</sub>

Значения углов β в слоях, прилегающих к нижнему торцу заготовки, больше, чем в верхних слоях, прилегающих к формующему заготовку пуансону (см. рис. 4.19). Это может быть объяснено изменением соотношения сжимающих и касательных напряжений, которое влияет на поворот частиц и угол β укладки зерен.



**Рис. 4.31.** Зависимость угла укладки частиц порошка  $\beta$  по слоям для двух схем формования: 0-0 – І схема формования; ×-× – ІІ схема формования; *a* – слой у верхнего торца заготовки;  $\delta$  – слой в середине высоты заготовки; *в* – слой у нижнего торца заготовки; по оси *R* – значение фактора *X*<sub>1</sub>

При правильно организованном процессе XOШ спеченных порошковых заготовок формоизменение заготовок происходит преимущественно в результате внутризеренных деформаций, межзеренные деформации играют второстепенную роль, которая заключается в повороте зерен в направлении течения материала заготовки. Поворот зерен осуществляется таким образом, чтобы плоскости скольжения в зернах были направлены наилучшим образом для протекания внутризеренных деформаций. На поворот зерен в заготовке существенное влияние оказывает схема формования.

Авторами данной монографии было проведено сопоставление качества деталей типа стаканов, изготовленных ХОШ из прошедших спекание заготовок, изготовленных с применением I и II схем формования (см. рис. 4.32).



Рис. 4.32. Детали, изготовленные закрытой прошивкой из спеченных заготовок: *a* – изготовленной по II схеме формования (см. рис. 4.19), *б* – изготовленной по I схеме формования

Было отмечено, что при ХОШ детали из спеченной заготовки, изготовленной по II схеме формования, на внешней ее поверхности в районе вблизи середины ее высоты имеются мелкие поперечные разрывы. При ХОШ детали из спеченной заготовки, формованной по I схеме, такие разрывы отсутствуют. Следовательно, меньшая величина угла β, характерная для I схемы формования, является предпочтительной.

В целом, результаты проведенного исследования показали, что изменение угла укладки зерен β при формовании заготовки с проведением МИО формуемого порошка и МИО формованной заготовки позволяет уменьшить различие ориентировки зерен при рассмотренных схемах формования. При этом сохраняется преимущество II схемы формования, заключающееся в уменьшении в 2,6 ... 2,8 раза удельной силы формования при достижении одинаковой плотности формованных заготовок, по сравнению с I схемой.

Таким образом, приведенная информация о текстуре формованной заготовки до ее спекания имеет практическое значение. В тоже время, процедура исследования угла укладки зерен  $\beta$  в формованной заготовке является более трудоемкой, чем исследование заготовки на срез для определения ее сдвиговой прочности  $\tau_{m}$ .

На основании данных из табл. 44 авторами данной монографии установлена корреляционная связь между углом  $\beta$  укладки зерен и  $\tau_{cp}$ . Также получено уравнение, позволяющее по величине  $\beta$  рассчитать  $\tau_{cp}$  или провести обратный пересчет этих величин:

$$\tau_{\rm cp} = 104, 26 - 2, 3 \ \beta. \tag{93}$$

При наличии уравнения связи между тср и прочностью  $\sigma_{\rm B}$ , которую эта заготовка будет иметь после спекания, можно оценить силу последующей штамповки машиностроительной детали из этой заготовки.

Ниже установлена корреляционная связь между  $\tau_{cp}$  до спекания и  $\sigma B$  спеченной заготовки, а также приведено полученное авторами уравнение, позволяющее по величине  $\beta$  рассчитать  $\tau_{cp}$  или провести обратный пересчет этих величин:

$$\sigma_{\rm B} = -56,7 + 8,33\tau_{\rm cn}.$$
 (94)

Уравнение получено в результате обработки фактических данных, приведенных в табл. 45.

Для специалистов в области обработки давлением испытание формованной заготовки на величину  $\tau_{cp}$  является несложным. В тоже время, металловедам проще провести металлографический анализ и измерить угол  $\beta$ . Поэтому установлена корреляционная связь между  $\beta$  и  $\sigma_{B}$  и приведено полученное авторами уравнение, позволяющее по величине  $\beta$  рассчитать  $\sigma_{B}$ спеченной заготовки или провести обратный пересчет этих величин:

$$\sigma_{\rm B} = 749, 3 - 17, 14\beta. \tag{95}$$

Отметим, что уравнения (93), (94) и (95) получены авторами на основании сильных корреляционных связей между рассматриваемыми параметрами. Рассчитанные коэффициенты парной корреляции по абсолютной величине были не менее 0,878.

Наряду с описанными выше методами оценки качества высокоплотных неспеченных порошковых заготовок, может быть исследована микротвердость на шлифах этих заготовок.

При проведении эксперимента порошок ПЖРВЗ.200.26 использовали в двух состояниях: в состоянии поставки и после МИО.

<u>№</u> п/п	Сдвиговая прочность неспеченной заготовки тср, МПа	Прочность детали после спекания σв, МПа
1	26,8	166
2	19,2	90
3	17,7	74
4	18,9	104
5	13,8	66
6	28,9	192
7	13,2	50
8	18,0	98
9	30,0	204

Табл. 45. Значения сдвиговой прочности до спекания и прочности материала после спекания

Заготовки из подготовленной порции порошка формовали по двум схемам, рис. 4.19.

У формованных заготовок до их спекания замеряли микротвердость на изготовленных из них меридиональных шлифах для металлографического исследования. Для замера микротвердости на поверхности шлифов были намечены 9 точек, рис. 4.27. В эксперименте варьировали:  $X_1$  – относительную координату точки измерения микротвердости по радиусу шлифа, отнесенную к диаметру формованной заготовки;  $X_2$  – относительную координату точки по высоте шлифа, отнесенную к диаметру формованной заготовки;  $X_2$  – относительную координату точки по высоте шлифа, отнесенную к диаметру формованной заготовки. Указанные факторы варьировали на 3 уровнях. Значение фактора  $X_3 = 0$  присвоено I схеме формования, значение  $X_3 = 1$  – II схеме формования. При отсутствии МИО порошка  $X_4 = 0$ , при наличии –  $X_4 = 1$ . При отсутствии МИО заготовки  $X_5 = 0$ , при наличии –  $X_5 = 1$ .

Замеры проводили прибором ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450-76 с равномерным дублированием (n = 3) в каждом из опытов.

После реализации и обработки результатов эксперимента получена следующая математическая модель:

$$y_{M} = 102,865 + 59,23 X_{1}^{2} - 18,47 X_{2}^{2} - 32,211 X_{1} - 0,813 X_{2} + 2,124 X_{3} - 3,2 X_{4} + 0,93 X_{5}.$$
(96)

Математическая модель (96) позволяет привести по ней расчет значений микротвердости в любой точке формованной заготовки, хотя для построения этой модели было проведено всего 9 опытов (при трех повторах каждого). С использованием математической модели (96) построены графики зависимости микротвердостей ( $H_{100}$ ) от факторов описанного выше эксперимента (рис. 4.33 – 4.36).



**Рис. 4.33.** Распределение микротвердости ( $H_{100}$ ) на меридиональном сечении заготовки: *a*) формование по I схеме; *b*) формование по II схеме



**Рис. 4.34.** Распределение микротвердости ( $H_{100}$ ) на меридиональном сечении заготовки при МИО порошка перед его формованием: *a*) формование по I схеме; *б*) формование по II схеме

Координатные сетки на меридиональных сечениях заготовок нанесены для определения местоположения на этих сечениях осей абсцисс построенных графиков и местоположения на осях абсцисс характерных точек этих графиков. Указанные сетки нанесены в условных величинах, которые понятны при рассмотрении рисунков. Ординатами графиков являются значения микротвердостей. Для характерных точек графиков эти значения указаны численно в стандартных единицах микротвердостей 100.



**Рис. 4.35.** Распределение микротвердости ( $H_{100}$ ) на меридиональном сечении заготовки при ее формовании с МИО: *a*) формование по I схеме;  $\delta$ ) формование по II схеме



**Рис. 4.36.** Распределение микротвердости ( $H_{100}$ ) на меридиональном сечении заготовки при МИО порошка и МИО заготовки: *a*) формование по I схеме; *б*) формование по II схеме

Анализ математической модели распределения микротвердостей и графиков, приведенных на рис. 4.33 – 4.36, показал следующее.

Значения микротвердостей по радиусу заготовки, формованной без МИО (рис. 4.33), распределяются по некой гиперболе с максимальными значения-

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

ми  $H_{100}$  в центре заготовки и вдоль ее боковых поверхностей. Минимальные значения  $H_{100}$  имеют место на расстояниях  $\approx \pm 0,5$ R, где R – радиус заготовки. Такие значения  $H_{100}$ , согласно кривым, можно объяснить тем, что на указанных расстояниях давления от осевой силы и ка¬сательных напряжений на боковых поверхностях ослабевают. В центре заготовки повышение  $H_{100}$  происходит под действием максимальных осевых напряжений. В боковых поверхностях повышение  $H_{100}$  обеспечивают касательные напряжения.

При II схеме формования равномерность распределения микротвердости по высоте заготовки выше, чем при I схеме, что является одним из преимуществ II схемы формования.

При сопоставлении I схемы формования со II схемой характер кривых не меняется, но при II схеме значения  $H_{100}$  возрастают, т.к. в частицах накапливаются деформации, и происходит их упрочнение по сравнению с I схемой, что сказывается на приросте  $H_{100}$ .

МИО порошка выравнивает значения  $H_{100}$  как по радиусу, так и по высоте заготовки, как при I, так и при II схемах формования. Как видно на рис. 4.34, крутизна кривых на графиках микротвердости становится очень незначительной, в отличие от заготовок из порошка, не подвергнутого МИО, что положительно сказывается в дальнейшем на качестве изделий после спекания.

Предположительно, снижение  $H_{100}$  в частицах порошка можно объяснить с использованием описанной ниже гипотезы. При МИО порошка передаваемая заготовке энергия уменьшает количество дефектов внутри частиц и приводит к повышению плотности дислокаций и, соответственно, наклепу на поверхности частиц. Косвенным подтверждением наклепа является то, что обработанные МИО порошки формуются хуже (их плотность становится ниже).

Наклеп на поверхности частиц порошка происходит одновременно с разрушением окружающих частицы оксидных пленок. Оба эти явления приводят к уменьшению остаточных напряжений II рода (по классификации Я.Б. Фридмана), которые уравновешиваются в объемах одного порядка с размерами зерен и их влияние существеннее, чем влияние остаточных напряжений III рода.

Уменьшение остаточных напряжений II рода проявляется при обработке формуемой заготовки, когда частицы находятся в плотном контакте между собой. При МИО формуемой заготовки распределение твердости по ее меридиональному сечению при формовании по II схеме (рис. 4.35,  $\delta$ ) такое же равномерное, как и при формовании по II схеме при МИО порошка (см. рис. 4.34,  $\delta$ ). Однако значения твердостей выше, чем при МИО порошка.

При сравнении кривых (см. рис. 4.34, *a* и 4.35, *a*), отражающих распределение твердости по меридиональному сечению заготовки, формованной по I схеме, распределение равномернее при формовании с МИО.

При проведении МИО как порошка, так и формуемой заготовки наблюдается (рис. 4.36) наиболее равномерное распределение твердости, поскольку такая обработка уменьшает остаточные напряжения II и III родов. При этом естественно, что пиковые значения ординат на графиках меньше, чем эти значения на рис. 4.33–4.35.

После извлечения формованных заготовок из матрицы их размеры изменяются. Явление увеличения объема формованных заготовок под действием внутренних напряжений называется упругим последействием [42]. Упругое последействие наблюдается после снятия давления и выражается в увеличении размеров по высоте заготовки и в радиальном направлении. Основная доля упругого расширения реализуется непосредственно после извлечения заготовки из матрицы, однако некоторое увеличение размеров может происходить в течение нескольких часов и даже нескольких дней.

Явление упругого последействия необходимо учитывать на этапе проектирования матрицы штампа. При этом на этапе проектирования надо задавать меньший диаметр матрицы, чем диаметр изготовленной в ней заготовки. Поэтому проектирование матрицы без учета явления упругого последействия приводит к неисправимому браку изготовленной матрицы. Этот дефект, характерный при изготовлении порошковых деталей, имеет сходство с дефектом при неправильном назначении размеров на штамповый инструмент, описанным выше, в комментарии к рис. 1.14.

Кроме этого, явление упругого последействия может явиться причиной появления в заготовках расслойных трещин.

Величина упругого последействия зависит от свойств формуемого порошка (размера, формы, состояния поверхности частиц, содержания оксидов, механических свойств материала частиц порошка), давления формования, наличия, вида и количества смазывающего материала и др. Уменьшение размеров частиц, увеличение содержания оксидов, твердости материала частиц, давления формования способствуют повышению величины упругого последействия.

Эффект упругого последействия по высоте заготовки больше, чем в радиальном направлении. Величина упругого последействия у заготовок с большой плотностью (90% и выше) в направлении сжатия пуансонами формуемой порошковой шихты достигает 5 ... 6%, в поперечном направлении – 1 ... 3%. Такое отличие связано с неравномерными условиями деформации (осевое напряжение внутри заготовки существенно больше бокового давления). Также с упругой деформацией матрицы, которая после снятия осевого давления на заготовку способствует увеличению размеров заготовки по высоте.

Наименьшее упругое последействие, как по высоте, так и по диаметру заготовки, наблюдается у отожженных порошков при средних давлениях формования. Так, для железного порошка при давлении формования 312 МПа увеличение размера заготовки вследствие упругого последействия по высоте составляет 0,456%, а по диаметру 0,203%. При давлении формова-

ния 624 МПа увеличение размера заготовки по высоте составляет 0,835%, а по диаметру 0,28% [42]. Однако приведенные здесь цифры зависят от толщины стенки матрицы, в которой осуществляется формование порошка. Выше в комментарии к рис. 2.5 в конце п. 2.2 авторы данной монографии отмечали, что упругая деформация матрицы зависит от модуля упругости E и коэффициента Пуассона v материала матрицы. Эти физические параметры позволяют рассчитать, насколько матрица, имеющая конкретные внутренний и наружный диаметры, упруго деформируется и увеличивает свои размеры под технологической нагрузкой, что в дальнейшем отражается на величине упругого последействия, выражающегося в изменении размеров извлеченной из матрицы формованной порошковой заготовки.

# 4.5. Штамповка высокоплотных полых деталей из порошковых сталей на этапе, предшествующем их спеканию

Марку порошковой стали характеризуют буквенные индексы и цифры. Первая буква «С» указывает на класс материала (сталь), вторая буква «П» – на метод производства (порошковая). После буквы «П» записывается среднее содержание углерода в сотых долях процента. Углерод является наиболее распространенным для железных порошков легирующим элементом, под действием которого изделие приобретает способность закаливаться. Символы других легирующих элементов следуют за цифрой, указывающей среднее содержание углерода.

Как и в случае сталей, производимых традиционными методами, легирующим элементам присвоены символы. Наиболее часто в качестве легирующих элементов в порошковых сталях используются следующие: Г – марганец, Д – медь, М – молибден, Н – никель, П – фосфор, Х – хром, Гр – графит. Символы легирующих элементов следуют за цифрой, указывающей среднее содержание углерода. Цифры, идущие за символом элементов, указывают примерное содержание данного легирующего элемента. При содержании его менее 1% цифра отсутствует. Цифра после дефиса характеризует группу плотности. Порошковым конструкционным материалам на железной основе присвоены следующие группы плотности: 1 – пористость 25 ... 16% (плотность 5,9 ... 6,6 г/см<sup>3</sup>), 2 – пористость 15 ... 10% (плотность 6,7 ... 7,1 г/см<sup>3</sup>), 3 – пористость 9...2% (плотность 7,15 ... 7,70 г/см<sup>3</sup>), 4 – пористость менее 2% (плотность более 7,70 г/см<sup>3</sup>). Буква «А» после цифры указывает на повышенное качество материала.

При производстве порошковых изделий используются все известные методы термической обработки. В тоже время термическая обработка порошковых изделий имеет некоторые особенности, обусловленные наличием пористости и в некоторых случаях неравновесностью структурного состояния [43]. Особенно заметно влияние пористости проявляется при закалке в масло. Поэтому масло как закалочная среда рекомендуется только при производстве деталей из легированных сталей с низкой критической скоростью закалки [1, 3, 5, 19].

Порошковые стали более чувствительны к термическим напряжениям, чем литые. В результате этого закалка в воде может привести к образованию трещин. При закалке в воде появления закалочных трещин можно избежать путем изоляции потенциальных концентраторов напряжений, например, мест резкого изменения сечения, от непосредственного контакта с закалочной средой с помощью асбеста, глины, слюды или других керамических материалов.

Исследования механических свойств закаленных порошковых сталей в зависимости от температуры отпуска показывают, что для них сохраняются те же закономерности отпуска, что и для деталей, изготовленных из проката. Однако отметим, что для порошковых сталей, легированных медью, требуется повышение температур отпуска.

Предварительная термическая или механическая (либо та и другая) обработки порошков применяются для изменения их физических характеристик и в ряде случаев сочетаются с операциями измельчения, смешения или просеивания. Так, например, применяют обработку в шаровых мельницах для измельчения и одновременно утяжеления (в результате, как уплотнения отдельных частиц, так и их укладки), а также перемешивания порошков; восстановительный отжиг – для повышения пластичности и улучшения формуемости (в результате восстановления оксидов и снятия наклепа), а также для образования однородных твердых растворов (гомогенизация шихты).

Изделия из легированных порошков имеют следующие механические характеристики.

При добавлении не более 0,2% углерода от массы порошка, предел прочности  $\sigma_{\rm B} = 120$  МПа, относительное удлинение образца  $\delta = 8\%$ , ударная вязкость КС = 350 кДж/м<sup>2</sup>.

При добавлении 0,8 … 1,1% углерода  $\sigma_{\rm B}$  = 200 МПа,  $\delta$  = 8%, КС = 220 кДж/м<sup>2</sup>.

У спеченного брикета путем закалки можно повысить  $\sigma_{\rm B}$  до 350 МПа, но при этом  $\delta$  снижается до 2%. Указанные характеристики относятся к образцам, имеющим остаточную пористость 10 ... 15%.

При уплотнении до пористости 2 ... 4% спеченный порошок имеет  $\sigma_{\rm B} = 450$  МПа,  $\delta = 10\%$ , КС = 450 кДж/м<sup>2</sup>.

Введение меди в порошковое железо повышает прочность, но снижает пластичность и ударную вязкость. Наиболее интенсивное возрастание прочности наблюдается при совместном введении меди (до 5 ... 6%) и углерода (до 0,3 ... 0,6%). Кроме того, медь повышает обрабатываемость порошкового материала резанием и сопротивление коррозии.

Легирование порошкового железа одним никелем применяется редко. При этом для существенного повышения механических характеристик необходимо спекание при высокой температуре. При введении в порошковую смесь никеля с графитом повышаются пластичность железографитовой композиции и, значительно, ударная вязкость.

Молибден при введении его в порошковую шихту является сильным карбидообразующим элементом. Он повышает прочность, но снижает пластичность стали. Наибольшее применение молибден имеет в сочетании с другими элементами, что обеспечивает существенное улучшение механических характеристик стали. Наиболее эффективное влияние молибдена на механические характеристики проявляется при его совместном введении с никелем и другими элементами, особенно, если изделия подвергают термообработке.

При легировании медью и никелем введение меди повышает прочность изделия, а добавление никеля – пластичность и ударную вязкость. Установлено, что если прочность на разрыв железно-медных образцов с пористостью 10% при содержании меди 2% составляет 260 ... 300 МПа, то при одновременном легировании железа 2% меди и 4% никеля прочность на разрыв достигает 400 ... 420 МПа, удлинение составляет 7 ... 8%, твердость 120 ... 127 *HB*.

Твердость закаленных с оптимальных температур деталей из порошковых сталей всегда ниже, чем деталей из проката аналогичного состава. Так, твердость закаленных деталей эвтектоидной стали марки СП80-2 пористостью 13% составляет 48 ... 52 *HRC*, в то время как у деталей из проката – 61 ... 63 *HRC*. Особенно заметно влияние пористости проявляется при закалке в масло.

Нагрев под закалку пористых деталей рекомендуется проводить в защитной от окисления среде. Температура нагрева под закалку для порошковых углеродистых сталей превышает критическую точку  $A_{c3}$  на 50...80°С. В качестве закалочной среды применяют воду или водные растворы солей. Температура нагрева под закалку для низколегированных сталей превышает критическую точку  $A_{c3}$  на 60 ... 80°С. В качестве закалочной среды обычно применяют воду, водные растворы солей и щелочей.

Критическими точками называют температуры, при которых в стали происходят какие-либо структурные или фазовые превращения. Критические точки обозначают буквой А. Поскольку температуры превращения зависят от скоростей нагрева и охлаждения, критические точки при нагреве и охлаждении не совпадают между собой.

Критические точки при нагреве обозначаются  $A_c$ , а при охлаждении  $A_r$ . В частности,  $A_{c1}$  – температура превращения перлита в аустенит при нагреве,  $A_{r1}$  – температура превращения аустенита в перлит при охлаждении.  $A_{c3}$  – температура окончания растворения феррита в аустените при нагреве,  $A_{r3}$  – температура начала выделения феррита из аустенита при охлаждении. Исследования механических свойств закаленных порошковых сталей в зависимости от температуры отпуска показывают, что для них сохраняются те же закономерности отпуска, что и для деталей, изготовленных из проката. Однако отметим, что для порошковых сталей, легированных медью, требуется повышение температур отпуска.

В последнее время применяется термическая обработка порошковых сталей с использованием индукционного нагрева. Это объясняется как высокой производительностью этого процесса, так и возможностью проведения термической обработки без применения защитных сред.

Высокий уровень прочностных свойств порошковых сталей наблюдается при легировании никелем и молибденом. Так, стали, содержащие 1 ... 3% никеля, 0,25 ... 1% молибдена, 0,4 ... 0,8% углерода, имеющие незначительную остаточную пористость до термообработки, обладают следующим комплексом механических характеристик:  $\sigma_{\rm B} = 600$  МПа,  $\delta = 10\%$ , KC = 150 кДж/м<sup>2</sup>, а после закалки приобретают:  $\sigma_{\rm B} = 1200$  МПа,  $\delta = 5\%$ , KC = 120 кДж/м<sup>2</sup>.

Введение хрома в порошковую смесь положительно влияет на структуру изделия. Совместное легирование хромом и никелем, хромом и молибденом позволяет изготавливать изделия с однородной структурой, ударная вязкость которых КС превышает 600 кДж/м<sup>2</sup>.

Ограниченное применение марганца в качестве легирующего элемента в порошковой металлургии связано с большой трудностью восстановления его из оксидов. Спекание содержащих марганец порошковых композиций требуется проводить при температурах 1200 ... 1300 °C. Совместное легирование марганцем и хромом существенно изменяет механические характеристики детали. Сталь, содержащая 0,6% углерода, 2% марганца и 2% хрома, имеет прочность 780 МПа, δ = 12%, КС = 700 кДж/м<sup>2</sup>.

В целях получения более однородных по составу и структуре изделий из механических смесей порошковых компонентов рекомендуется перед формованием подвергать смесь отжигу при 800 ... 850 °C. Такая термообработка обеспечивает изготовление изделий с повышенными механическими характеристиками.

Формование полой порошковой детали высокой плотности из порошковой стали осуществляют на специализированном гидравлическом прессе, в конструкции которого предусмотрено сближение пуансонов и возвратно-поступательное перемещение матрицы от автономного привода. Конструкции таких прессов описаны в 5 разделе данной монографии.

Порцию порошковой шихты засыпают через верхнее отверстие в матрице 3 (рис. 4.37), при этом пуансон *1* вынут из матрицы. После окончания засыпки шихты пуансон устанавливают в верхнее отверстие полости матрицы и производят уплотнение порошка путем формования заготовки при двухстороннем приложении давления и при одновременном радиальном выдавливании за счет перемещения порошка относительно конической части матрицы. При формовании полой детали это достигается путем одновременного сближения пуансонов l и 2 со скоростью  $v_n$  и перемещения матрицы 3 в сторону пуансона l со скоростью  $v_n$  (см. рис. 4.37, a).



Рис. 4.37. Схема штампа для формования полой порошковой детали

Когда давление на пуансон 2 достигает заданной величины, начинается прямое выдавливание при двухстороннем приложении давления путем продолжения перемещения пуансона 2 в направлении стрелки  $v_{\rm M}$  (см. рис. 4.37,  $\delta$ ), которое осуществляется перемещением матрицы 3 со скоростью  $v_{\rm M}$  в сторону пуансона 2.

Схема формования, приведенная на рис. 4.37, аналогична схеме формования детали без полости, показанной ранее на схеме на рис. 4.19.

Деталь с наружным диаметром 32 мм, диаметром полости 20 мм, глубиной полости 85 мм изготавливали из порошковой шихты, содержащей ПЖВ2.160.28 + 0,8% графита + 0,8% стеарата цинка, и из шихты, содержащей ПЖВ4.160.26 + 0,8% графита + 0,8% стеарата цинка. Давление на пуансоне 2 на этапе прямого выдавливания при первой шихте не превышало 1200 МПа, при второй шихте – 1500 МПа. Средняя плотность деталей из первой шихты составляла 94%, из второй шихты – 93%. Неравномерность плотности по высоте детали была не более 5% при обеих шихтах. Фотографии деталей приведены на рис. 4.36.

Изготовленные детали (рис. 4.38) имели существенный недостаток. Он заключался в том, что над верхним торцом пуансона 2 в формуемой шихте образовывалась застойная зона конической формы, и по ее границе вследствие больших деформаций сдвига зарождалась трещина. Даже при выполнении



Рис. 4.38. Детали, изготовленные формованием из порошковой шихты

торца пуансона сферическим застойный конус меньшего размера, чем при плоском торце пуансона, имел место.

Для устранения этого недостатка предложена схема формования полой порошковой детали [1, 3, 5], приведенная на рис. 4.39.

Детали типа стаканов изготавливают с фланцем, который является технологическим припуском. Матрица имеет полость, состоящую из участков двух диаметров: диаметр одного участка равен диаметру внешней поверхности стакана, а диаметр другого – диаметру фланца стакана. На первом этапе формования матрицу перемещают вниз (рис. 4.39, *a*), при этом засыпную полость образует участок ее полости большего диаметра, а силы трения на поверхности контакта порошка с матрицей способствуют заполнению полости матрицы.

После окончания засыпки порошка и предварительного его уплотнения верхним пуансоном осуществляется движение матрицы вверх (рис. 4.39, *б*), при этом сформованный на первом этапе стакан перемещается в участок полости матицы меньшего диаметра.



Рис. 4.39. Схема формования стаканов с созданием интенсивных сдвигов в материале порошковой заготовки

В результате происходит дополнительное уплотнение стенок стакана (рис. 4.39, *в*). На донную часть заготовки постоянно действует сила, создаваемая верхним пуансоном.

### 4.6. Анализ напряжений и деформаций в заготовке и удельных сил на пуансонах при штамповке высокоплотных полых деталей

Анализ кинематического и напряженного состояний порошковой заготовки отличается от анализа сплошной учетом сжимаемости материала.

В тоже время, если целью анализа напряженного состояния является определение необходимой для штамповки силы пресса или расчет на прочность штампового инструмента, рассматривается конечный момент штамповки, когда сила максимальна. Разработанные авторами монографии механические схемы приложения деформирующих сил к пористой заготовке позволяют обеспечить плотность детали 95% и выше как при штамповке предварительно спеченных заготовок, так и непосредственно порошка. В этом случае учет сжимаемости материала имеет в большей степени теоретическое значение, чем практически влияет на кинематику течения и напряженное состояние порошковой заготовки.

С целью оценки погрешности, имеющей место при применении результатов исследования кинематического состояния при штамповке несжимаемых заготовок для описания кинематического состояния при штамповке порошковых заготовок, имеющих пористость 13 ... 15%, проведен следующий эксперимент.

Деформировали разрезные цилиндрические образцы с начальной высотой и диаметром, равными 30 мм, из алюминиевого сплава AB и изготовленные формованием и спеканием из железного порошка ПЖВ4.160.28. Диаметр полости матрицы составлял 30 мм, диаметр пуансона – 20 мм. На поверхность меридионального разреза образцов была нанесена квадратная делительная сетка с шагом 1,5 мм. Компоненты тензора скоростей деформаций определяли по искаженной сетке на основании известных соотношений [44].

Исследовано распределение в заготовке интенсивности деформации в зависимости от следующих факторов. Материал заготовки  $X_1$ , глубина внедрения пуансона  $X_2$  (отнесенная к его диаметру), исходная координата по горизонтали точки на меридиональном сечении заготовки  $X_3$  (отнесенная к диаметру заготовки), исходная координата точки по вертикали  $X_4$  (отнесенная к диаметру заготовки). Центр координат располагался на оси заготовки на верхнем ее торце (рис. 4.40). Всего эксперимент включал в себя 16 опытов, сочетания значений названных факторов в каждом из этих опытов приведены под соответствующими номерами в табл. 46.

№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	AB	0,25	0,1	0,15	9	AB	0,25	0,4	0,45
2	ПЖВ4.160.28	0,25	0,3	0,3	10	ПЖВ4.160.28	0,25	0,2	0,6
3	AB	0,25	0,4	0,6	11	AB	0,25	0,1	0,3
4	ПЖВ4.160.28	0,25	0,2	0,45	12	ПЖВ4.160.28	0,25	0,3	0,15
5	AB	0,5	0,3	0,6	13	AB	0,5	0,2	0,3
6	ПЖВ4.160.28	0,5	0,1	0,45	14	ПЖВ4.160.28	0,5	0,4	0,15
7	AB	0,5	0,2	0,15	15	AB	0,5	0,3	0,45
8	ПЖВ4.160.28	0,5	0,4	0,3	16	ПЖВ4.160.28	0,5	0,1	0,6

Табл. 46. Матрица плана эксперимента

На рис. 4.40, *a* и 4.40, *б* на половинах меридиональных сечений заготовок до их деформации, расположенных слева от показанных штрихпунктирными линиями продольных осей заготовок, очерчены контрольные ячейки, имеющие значения координат, совпадающие со значениями, указанными в столбцах  $X_3$  и  $X_4$  табл. 46.

На рис. 4.40 и далее на рис. 4.41 приведены всего лишь по 2 разрезных образца. При этом в каждой из позиций *а* и *б* этих рисунков (с целью сокращения общего количества рисунков) объединены заготовки из сплава AB и порошка ПЖ4.160.28. Объединение заключалось в очерчивании на образце в каждой из позиций не 4, а 8 ячеек.

Подчеркнем отличие описанного здесь исследования от традиционных методов исследований с использованием координатных сеток. В описанном здесь исследовании глубина внедрения пуансона на 0,5 его диаметра обеспечивается не пошаговым его внедрением на глубину, кратную 0,25 его диаметра, а непрерывным внедрением, начиная от установки на торец заготовки до заданной планом эксперимента глубины, характеризуемой значением  $X_2$  в приведенных ниже математических моделях.

На рис. 4.41, *а* и 4.41, *б* на половинах меридиональных сечений заготовок расположенных слева от показанных штрихпунктирными линиями продольных осей заготовок очерчены ячейки, имеющие те же номера, что и на исходных координатных сетках (см. рис. 4.40), но находящиеся в тех положениях, в которые они переместились после закрытой прошивки полостей.

В табл. 46 приведены координаты r и z центральных точек контрольных ячеек (далее – просто точек) после закрытой прошивки (см. рис. 4.41) и рассчитанные по приведенной методике в работе [44] величины интенсивностей деформации  $\varepsilon$ і в контрольных ячейках.



Рис. 4.40. Координаты контрольных ячеек на диаметральных сечениях исходных разрезных цилиндрических заготовок: a – из сплава AB и порошка ПЖ4.160.28, для закрытой прошивки полости глубиной 0,25 диаметра пуансона;  $\delta$  – из этих же материалов для прошивки полости глубиной 0,5 диаметра пуансона



Рис. 4.41. Координаты контрольных ячеек (см. рис. 4.40) после закрытой прошивки заготовок: a – из сплава АВ и порошка ПЖ4.160.28, при глубине полости, равной 0,25 диаметра пуансона;  $\delta$  – из этих же материалов при глубине полости, равной 0,5 диаметра пуансона

Принят следующий общий вид математических моделей, коэффициенты которых определяли в результате эксперимента:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i X_i + \sum_{i=3}^4 b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=3}^4 b_{iii} X_i^3.$$
(97)

Расчет коэффициентов моделей вида (97) проведен на основании данных, приведенных в табл. 47.

**Табл. 47.** Измеренные после закрытой прошивки образцов и рассчитанные по моделям (95) и (96) координаты контрольных ячеек, а также интенсивности деформации в ячейках, определенные по методике из работы [44] и рассчитанные по модели (97)

N⁰	Координат	ы точек пос	-			
опыта	r	Г <sub>расч</sub>	Z	Z <sub>расч</sub>	$\boldsymbol{\varepsilon}_{i}$	$\varepsilon_i$ расч
1	0,12	0,13	0,39	0,36	1,24	1,23
2	0,32	0,33	0,32	0,37	1,18	1,16
3	0,41	0,40	0,06	0,10	0,38	0,46
4	0,22	0,24	0,16	0,14	0,92	0,95
5	0,31	0,33	0,07	0,06	1,30	1,23
6	0,14	0,13	0,11	0,16	1,36	1,34
7	0,29	0,29	0,31	0,39	1,80	1,64
8	0,44	0,45	0,44	0,45	1,35	1,19

N⁰	Координат	ы точек пос	0	0,000			
опыта	r	$r_{\rm pacu}$	Z	$Z_{\rm pac4}$	$\epsilon_i$	$\varepsilon_i$ pace	
9	0,42	0,42	0,21	0,22	0,94	0,81	
10	0,21	0,21	0,05	0,01	0,59	0,61	
11	0,12	0,13	0,29	0,26	1,22	1,28	
12	0,35	0,33	0,46	0,47	1,13	1,10	
13	0,32	0,30	0,30	0,28	1,58	1,69	
14	0,43	0,44	0,62	0,55	0,94	1,14	
15	0,36	0,36	0,23	0,18	1,44	1,56	
16	0,11	0,10	0,03	0,04	1,03	0,99	

Окончание таблицы 47

После расчета коэффициентов моделей вида (97) получены следующие уравнения:

$$r = -0,245 - 0,016 X_{1} + 0,112 X_{2} + 3,684 X_{3} + 0,273 X_{4} - 9,589 X_{3}^{2} - 0,683 X_{4}^{2} + 11,19 X_{2}^{3} + 0,332 X_{4}^{3}.$$
(98)

$$z = 0,648 + 0,042 X_{1} + 0,088 X_{2} - 3,249 X_{3} + 1,142 X_{4} + 10,727 X_{3}^{2} - 5,817 X_{4}^{2} - 12,309 X_{3}^{3} + 4,973 X_{4}^{3}.$$
(99)

$$\varepsilon_{i} = 0,942 - 0,175X_{1} + 1,6X_{2} - 8,213X_{3} + 3,268X_{4} + 44,443X_{3}^{2} - -7,369X_{4}^{2} - 71,616X_{3}^{3} + 2,652X_{4}^{3}$$
(100)

Задачей исследования с использованием заготовок из сжимаемых и несжимаемых материалов была оценка величины ошибки при применении кинематики течения, основанной на законе постоянства объема, для расчетов операций деформирования заготовок из железного порошка. На заключительной стадии штамповки таких заготовок их средняя остаточная пористость составляет лишь несколько процентов. Для несжимаемых материалов существует большой «арсенал» методов и формул, а для сжимаемых материалов их практически нет. Заманчиво применить имеющиеся формулы, но обосновав при этом правомерность такого применения.

Судя по модели (100), сжимаемость заготовки вносит погрешность в расчет интенсивности деформаций не более 17,5%. Это происходит на начальной стадии закрытой прошивки, когда есть возможность измерить искажения координатной сетки. Остаточная пористость заготовки на начальной стадии приблизительно 15%. На заключительной стадии закрытой прошивки, когда пористость заготовки значительно меньше, чем на начальной стадии прошивки, погрешность результатов исследования с отказом от учета сжимаемости заготовки значительно меньше указанной выше.

Для порошковой заготовки понятие напряжения текучести ранее не применялось. В условиях пластичности пористых тел используют напряжение текучести материала, из которого изготовлен порошок [45].

В тоже время для возможности применения математических выражений, полученных для анализа деформирования сплошных заготовок, к анализу деформирования высокоплотных порошковых заготовок целесообразно ввести понятие условного напряжения текучести порошковой заготовки.

Ниже изложена методика, позволяющая определить условное напряжение текучести порошковой заготовки с учетом реальных свойств исследуемого порошка на основании данных по формованию в закрытой матрице.

Для анализа напряжений в порошковой заготовке, имеющей высокую плотность, допустив, что она более не уплотняется под действием гидростатического давления, можно использовать критерий пластичности беспористого материала Губера – Мизеса, записав его в цилиндрических координатах в виде:

$$(1/2)\left[\left(\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta}\right)^{2} + \left(\sigma_{\theta} - \sigma_{z}\right)^{2} + \left(\sigma_{z} - \sigma_{\rho}\right)^{2} + 6\left(\tau_{\rho\theta}^{2} + \tau_{\theta z}^{2} + \tau_{\rho z}^{2}\right)\right] = \left(\phi\sigma_{s0}\right)^{2}$$

$$(101)$$

Входящую в правую часть равенства (101) величину  $\phi \sigma_{s0}$ , на месте которой в теории пластичности беспористого материала стоит напряжение текучести  $\sigma_{s}$ , авторы данной монографии назвали условным напряжением текучести порошковой заготовки. Для определения условного напряжения текучести неспеченной порошковой заготовки предлагается следующая методика.

Выполняют серию экспериментов по холодному формованию в закрытой матрице брикетов с отношением высоты к диаметру меньше 0,5 из исследуемой порошковой шихты. На основании проведенных опытов строят зависимость между удельной силой формования и средней плотностью полученного брикета. Кроме того, используют специально выведенную теоретическую зависимость между удельной силой формования и средней плотностью при уплотнении порошка в закрытой матрице с учетом трения по контактной поверхности. Для этого решают систему уравнений равновесия с использованием формулы для коэффициента бокового давления и с учетом начальных и граничных условий.

Сравнивая удельные силы формования, полученные теоретически и экспериментально, находят зависимость напряжения текучести неспеченной порошковой заготовки от плотности. Условие пластичности для пористого материала (101) при формовании цилиндрических образцов имеет вид:

$$\sigma_{\rho}^2 - \sigma_{\rho}\sigma_z + \sigma_z^2 + 3\tau_{\rho z}^2 = \varphi^2 \sigma_{s0}^2, \qquad (102)$$

где  $\sigma_{\rho}$ ,  $\sigma_z$  – нормальные напряжения,  $\tau_{\rho z}$  – касательное напряжение,  $\sigma_{S0}$  – напряжение текучести твердой фазы пористого материала,  $\varphi = \varphi(\Pi, \sigma_0)$  – функция пористости и среднего нормального напряжения.

Уравнения связи между деформациями и напряжениями следующие:

$$d\xi_{\rho} = d\lambda[3(\sigma_{\rho} - \sigma_{0}) - (2/3)\sigma_{s0}^{2}\phi(\partial\phi/\partial\sigma_{0})];$$
  

$$d\xi_{z} = d\lambda[3(\sigma_{z} - \sigma_{0}) - (2/3)\sigma_{s0}^{2}\phi(\partial\phi/\partial\sigma_{0})];$$
  

$$d\gamma_{\rho z} = 3d\lambda\tau_{\rho z},$$
(103)

где  $d\lambda$  – неопределенный множитель Лагранжа.

При формовании в закрытой матрице имеет место только осевая деформация, радиальное перемещение материала отсутствует. Это подтверждается следующим экспериментом.

В матрицу перед засыпкой порошка поместили формочку из папиросной бумаги. Она представляла собой цилиндр с одним донышком, полость которого была разделена на концентрические объемы бумажными концентрическими формочками. Каждый из образованных таким образом объемов засыпали попеременно порошком меди и железным порошком. Затем провели уплотнение многослойного образца. После уплотнения брикет разрезали по меридиональной плоскости. На разрезах видно (рис. 4.42), что диаметры соответствующих слоев в процессе уплотнения не изменяются.

Поскольку деформация  $\xi_{\theta}$  равна 0, то из (103) следует, что  $\sigma_{\rho} = \sigma_{\theta}$ . Поэтому выражение для среднего нормального напряжения можно преобразовать к виду

$$\sigma_0 = (2\sigma_0 + \sigma_z)/3 = \sigma_0 (2 + \sigma_z / \sigma_0)/3. \tag{104}$$



**Рис. 4.42.** Уплотнение многослойной порошковой заготовки при формовании в закрытой матрице: справа – начало уплотнения, слева – окончание

Отношение  $\sigma_{\rho}/\sigma_{z}$  обозначено как  $\alpha$  – коэффициент бокового давления. Тогда  $\sigma_{0} = \sigma_{\rho}(2+1/\alpha)/3 = \sigma_{\rho}(1+2\alpha)/(3\alpha)$ . Из второго уравнения системы (103) следует:

$$3\sigma_0(\alpha - 1)/(1 + 2\alpha) = (2/3)\sigma_{s0}^2\varphi(\partial\varphi/\partial\sigma_0).$$
(105)

Принято, что  $\phi = \phi(\sigma_0)$ , поскольку влияние среднего напряжения на величину коэффициента  $\phi$  значительно больше, чем влияние плотности порошка. При этом допущении выражение (105) преобразуется к виду

$$3\sigma_0(\alpha - 1)/(1 + 2\alpha) = 2\sigma_{s0}^2 \varphi(d\varphi/d\sigma_0)/3.$$
(106)

Интегрирование (106) с учетом граничного условия: при  $\sigma_0 = 0 \ \phi = \phi_0$ , позволяет получить

$$\varphi^{2} = 9(\alpha - 1)\sigma_{0}^{2} / [2(1 + 2\alpha)\sigma_{s0}^{2}] + \varphi_{0}^{2}.$$
 (107)

С учетом (106) выражение (102) записано в следующем виде:

$$3(\sigma_{\rho} - \sigma_{z})^{2} / [2(1 - \alpha)] + 3\tau_{\rho z}^{2} = \sigma_{i}^{2} = \sigma_{s}^{2}, \qquad (108)$$

где  $\sigma_s$  – условное напряжение текучести.

Схема процесса формования в закрытой матрице приведена на рис.4.43. Введены следующие обозначения относительных размеров:  $\rho = \overline{\rho} / \overline{R}, \ z = \overline{z} / \overline{R}, \ h = \overline{h} / \overline{R} (\overline{\rho}, \overline{R}, \overline{z}, \overline{h})$  показаны на рис. 4.43).

Уравнения равновесия имеют вид

$$\left. \begin{array}{l} \partial \sigma_{\rho} / \partial \rho + \partial \tau_{\rho z} / \partial z = 0, \\ \partial \tau_{\rho z} / \partial \rho + \tau_{\rho z} / \rho + \partial \sigma_{z} / \partial z = 0. \end{array} \right\}$$
(109)

Из условия пластичности (108), пренебрегая касательными напряжениями, получено

$$\partial \sigma_0 / \partial z = \partial \sigma_z / \partial z_1$$
 (110)





Решение системы уравнений (109) позволило вывести формулу для определения удельной силы формования

$$q = \left\{ \frac{\mu\alpha\beta(24+\beta)ch(\sqrt{\beta}h)}{12[\sqrt{\beta}(8+\beta)sh(\sqrt{\beta}h) - 4\mu(4+\beta)(ch\sqrt{\beta}h-1)]} + 1 \right\} \times (111)$$
$$\times \sqrt{2/[3(1-\alpha)]}\sigma_s$$

На рис. 4.44 приведены зависимости, полученные в соответствии с описанной выше методикой.



**Рис. 4.44.** Зависимости условного напряжения текучести от плотности заготовки: *1* – порошок ПЖВ4.160.28, *2* – порошок ПЖВ2.160.28

Величину коэффициента бокового давления α можно определить экспериментально, например, используя штамп со встроенными точечными месдозами. В данном исследовании нами использовались величины α, полученные И.Д. Радомысельским [47].

Плотность брикета определялась как средняя величина по методу гидростатического взвешивания, при этом для уменьшения погрешности из-за неравномерности плотности по высоте образца навеска порошка выбиралась так, чтобы брикет получался относительно низким ( $D/h \ge 2$ ). Коэффициент трения принимался равным 0,3.

При исследовании влияния смазки на величину напряжения текучести установлено, что изменение вида смазки практически не влияет на эту величину.

Зависимости, представленные на рис. 4.44, можно аппроксимировать формулой:  $\sigma_s = a\gamma^b$ , где  $\sigma_s$  измеряется в МПа,  $\gamma$  – средняя плотность заготовки, в кг/м<sup>3</sup>. Коэффициенты имеют значения: для ПЖВ2.160.28  $a = 70,7 \times 10^{-12}$ ; b = 3,34; для ПЖВ4.160.28  $a = 102,8 \times 10^{-12}$ , b = 3,36.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет определить условное напряжение текучести с учетом реальных свойств пористого материала.

## 4.7. Применение метода при исследовании операции изготовления полых тонкостенных деталей



Рис. 4.45. Высокоплотные втулки, формованные из порошковой шихты на железной основе



Рис. 4.46. Обозначения величин, используемых в анализе формования втулки

Ниже изложен анализ операции формования порошковых втулок высокой плотности (рис. 4.45).

При формовании втулок из железного порошка активно направленные напряжения контактного трения создаются путем перемещения оправки со скоростью v навстречу матрице, движущейся со скоростью  $v_0$  (рис. 4.46) [1, 3, 5]. Порошок как бы «затягивается» силами трения в тонкую часть стенки.

В результате в этой наиболее тонкой части стенки втулки имеют наибольшую плотность и прочность. В этом состоит преимущество разработанного способа перед обычными способами формования, в которых порошок в тонкой части втулки остается неуплотненным. Недостаток, имеющий место при обычных способах и заключающийся в образовании расслоений при относительной плотности 80 ... 85%, здесь устранен созданием сдвигов слоев в материале заготовки. В результате достигнута средняя относительная плотность 92%.

При выполнении этой технологической операции порошок засыпают со стороны тонкой части полости между оправкой и матрицей. При этом, чтобы открыть отверстие для засыпки порошка, оправку опускают так, что верхний торец оправки располагается немного ниже верхнего основания конической части полости матрицы. Порошок хорошо засыпает-
ся в расширяющуюся полость, равномерно заполняя ее. Далее движением оправки вверх перекрывают отверстие в матрице, через которое производилась засыпка, и одновременно используя трение порошка об оправку, перемещают его в направлении тонкой части стенки и уплотняют в этой области. Следующим движением, опуская силой пресса матрицу навстречу окружающему оправку неподвижному кольцевому пуансону, формуют втулку.

Поскольку прочность порошковых деталей увеличивается с увеличением их плотности и зависит от величины давления формования, разработка технологического процесса включает в себя определение силы формования, необходимой для обеспечения заданной средней плотности детали. Определение этой силы описано ниже.

Введены следующие обозначения размеров инструмента и скорости деформирования заготовки (рис. 4.46):

$$z = \frac{\overline{z}}{\overline{r}}; \ h = \frac{\overline{h}}{\overline{r}}; \ \rho = \frac{\overline{\rho}}{\overline{r}}; \ R = \frac{\overline{R}}{\overline{r}}; \ v_z = \frac{\overline{v}_z}{\left|\overline{v}_0\right|}.$$

В ходе деформирования высота области I изменяется от  $h_0$  до  $h_k$ . Кинематически возможные скорости течения в области I выбраны в виде:

$$v_{z} = D z + A(\rho - R) \frac{z}{h},$$

$$v_{\rho} = 0.$$
(112)

Эти выражения удовлетворяют граничным условиям:

при 
$$z = 0$$
  $v_z^I = 0$ , при  $z = h$   $v_z^I = v_z^{II}$ . (113)

Скорости течения в области II, учитывая граничные условия: при  $\rho = \rho_{zp} \quad v_z \sin \beta + v_\rho \cos \beta = v_0 \sin \beta$ , при  $\rho = 1$ , приняты в виде:  $v_\rho^{II} = 0$ 

$$v_{z}^{II} = B[R - (z - h)tg\beta - 1]ctg\beta + A[\rho - R + (z - h)tg\beta] - 1,$$

$$v_{\rho}^{II} = B(1 - \rho).$$
(114)

Из условия (11300) определена величина

$$D = [B(R-1)ctg\beta - 1] / h.$$

Варьируемые параметры *А* и *В* определяются из условия минимума мощности деформации методом Ритца. Распределение касательных напряжений по поверхностям контакта инструмента и заготовки принято в виде

$$\tau = \mu \sigma_{s}.$$
 (115)

Скорости деформаций в области I, рассчитанные по уравнениям Коши:

$$\xi_{\rho} = \xi_{\theta} = 0, \quad \xi_{z} = 0, \quad \eta_{\rho z} = \frac{Az}{h}.$$

Интенсивность скоростей деформаций

$$\xi_i^I = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{2[D + \frac{A(\rho - 2)}{h}]^2 + \frac{3A^2 z^2}{2h^2}}.$$

Скорости деформаций в области II:

$$\xi_{\rho} = -B$$
,  $\xi_{\theta} = \frac{B(1-\rho)}{\rho}$ ,  $\eta_{\rho z} = A$ .

Интенсивность скоростей деформаций

$$\xi_i^{II} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\frac{2B^2}{\rho^2} - \frac{2ABtg\beta}{\rho} + 2A^2tg^2\beta + 1.5A^2}.$$

Входящие в выражения (112) и (114) параметры *A* и *B* определены путем решения системы уравнений, в которой оперируют следующим выражением:

$$I = \int_{V^{I}} \sigma_{i}\xi_{i}dV + \int_{V^{II}} \sigma_{i}\xi_{i}dV + \int_{V^{I}} \sigma_{0}\xi_{V}dV + \int_{V^{II}} \sigma_{0}\xi_{V}dV + \int_{V^{II}} |\Delta v_{\tau}| |\tau| dF + \int_{F_{r}I} |\Delta v_{\tau}| |\tau| dF + \int_{F_{r}I} |\Delta v_{\tau}| |\tau| dF -$$
(116)  
$$- \int_{F_{R}II} |\Delta v_{\tau}| |\tau| dF + \int_{S_{p}} \frac{\sigma_{s}}{\sqrt{3}} |\Delta v| dS ,$$

где  $\int_{V^{j}} \sigma_{i} \xi_{i} dV$  – мощность деформации сдвига в *j*-й области;

 $\int_{V} \sigma_0 \xi_V dV$  – мощность объемной деформации в *j*-й области;

 $\int_{F_r^j} |\Delta v| |\tau| dF$  – мощность силы трения по поверхности  $F_r$  в j-й области;

 $\int_{Sp} |\Delta v| \sigma_s dS / \sqrt{3}$  – мощность силы, приводящей к сдвиговым деформациям

по границе  $S_p$ .

Мощность силы трения по поверхности пуансона с радиусом *r* в областях I и II в выражении (103) взята со знаком «плюс», поскольку направления касательных напряжений и скорости течения материала противоположны. Силы трения затрудняют формование. Мощность силы трения по поверхности матрицы в областях I и II в выражении (103) взята со знаком «минус», так как направления касательных напряжений и скорости течения материала совпадают. В данном случае напряжения трения являются активными, они способствуют формованию детали.

Выражение (103) продифференцировано по параметрам *A* и *B*, и частные производные приравнены нулю. Получена система из двух дифференциальных уравнений.

Решение этой системы производится с использованием следующего преобразования. Полагая, что значение  $\xi_i$  в каждой точке очага пластической деформации не сильно отличается от среднего  $\xi_{cn}$ , получаем

$$\iiint_{V} \sigma_{s} \frac{\partial \xi_{i}}{\partial a_{i}} dV = \frac{1}{2\xi_{cp}} \iiint_{V} \frac{\partial \xi_{i}^{2}}{\partial a_{i}} dV,$$

где *а*, принимает значения *А* и *В*.

В последнем преобразовании  $\xi_{cp}$  определялось в предположении равномерности деформации. В случае равномерной деформации в выражениях (99), (101) A = 0,  $B = B_{cp}$ . Тогда

$$\xi_{i_{cp}}^{I} = 2[B_{cp}(R-1)ctg\beta - 1]/3h.$$

Входящий в числитель преобразования член

$$\int_{V^{I}} \xi_{i}^{2} dV = \frac{2\pi}{9} \{ 2D^{2} (R^{2} - 1)h + 0.5A^{2}h(R^{2} - 1) + 4AD(3R - 2 - R^{3})/3 + A^{2}(R^{4} - 6R^{2} + 8R - 3)/3h \}$$

Первая вариация мощности внутренних сил в области І

$$\delta \int_{V^{I}} \sigma_{i} \xi_{i} dV = \frac{\pi \sigma_{s} h \delta \{ 12D^{2} (R^{2} - 1)h + 3A^{2}h(R^{2} - 1) + 36[B_{cp}(R - 1)ctg\beta - 1] + 36[B_{cp}(R - 1)ctg\beta - 1] }{36[B_{cp}(R - 1)ctg\beta - 1]} .$$
(117)

В области II

$$\xi_{i_{cp}}^{II} = \frac{2\sqrt{2B_{cp}}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{R\ln R - R + 1}{(R - 1)(R^2 + R - 2)}}$$

Входящий в числитель преобразования член

$$\int_{V^{II}} \xi_i^2 dV = \frac{4\pi}{9tg\beta} \{ 2B^2 (R \ln R - R + 1) - AB(R - 1)^2 tg\beta + A^2 (2tg^2\beta + 1.5)(R^3 - 3R + 2)/6 \}$$

Первая вариация мощности внутренних сил в области II

$$\delta \int_{V^{II}} \sigma_i \xi_i dV = \frac{\pi \sigma_s}{3\sqrt{6}B_{cp} tg\beta} \sqrt{\frac{(R-1)(R^2+R-2)}{R\ln R-R+11}} \times \delta \{2B^2 (R\ln R-R+1) - AB(R-1)^2 tg\beta + \cdot + A^2 (2tg^2\beta + 3/2) (R^3 - 3R + 2)/6\}$$
(118)

Мощность силы трения по поверхности матрицы в области II определена из следующих соображений.

Относительная скорость течения в направлении, противоположном действию касательных напряжений, имеет вид:

при 
$$\rho = \rho_{\rm rp} \quad \left| \Delta v_{\tau}^{II} \right| = \left| v_z \cos \beta - v_\rho \sin \beta + \cos \beta \right|,$$

после подстановки выражений (101) получено:

$$\left|\Delta v_{\tau}^{II}\right|_{\rho=\rho_{cp}} = \frac{B[R-(z-h)tg\beta-1]}{\sin\beta}$$

С учетом принятого закона трения по граничным поверхностям (115),

$$\int_{FII} \left| \Delta v_{\tau}^{II} \right|_{\rho = \rho_{\rm rp}} \left| \tau \right| dF = \frac{\pi \mu \sigma_s B(R-1)^2 \left( 2R+1 \right)}{3 \sin^2 \beta} \,. \tag{119}$$

Скорость течения по цилиндрической поверхности оправки в области II (при  $\rho = 1$ ):

$$\left|\Delta v_{\tau}^{II}\right|_{\rho=1} = -\left\{B\left[R - (z-h)tg\beta - 1\right]ctg\beta + A\left[1 - R + (z-h)ctg\beta\right] - 1\right\}$$

Мощность силы трения по поверхности оправки в области II:

$$\int_{F_r II} \left| \Delta v_{\tau}^{II} \right|_{\rho=1} \left| \tau \right| dF = -\frac{\mu \pi \sigma_s (R-1)^2}{t g^2 \beta} \left( B - A t g \beta - \frac{2 t g \beta}{R-1} \right).$$
(120)

В области I скорость течения порошкового материала относительно поверхности оправки

$$\left|\Delta v_{\tau}^{I}\right|_{\rho=1} = -\left[Dz + \frac{A(1-R)}{h}z\right].$$

Мощность силы трения по поверхности оправки в области І

$$\int_{F_r I} \left| \Delta v_{\tau}^I \right|_{\rho=1} \left| \tau \right| dF = -\mu \pi \sigma_s h \left[ B(R-1) ctg\beta - 1 + A(1-R) \right].$$
(121)

Скорость течения в области І у поверхности матрицы

$$\left|\Delta v_{\tau}^{I}\right|_{\rho=1} = 1 + Dz$$

Мощность силы трения по поверхности матрицы в области I:

$$\int_{F_R I} \left| \Delta v_{\tau}^I \right|_{\rho=R} \left| \tau \right| dF = \pi \mu \sigma_s Rh \left[ 1 - B(R-1)ctg\beta \right].$$
(122)

Мощность силы, приводящей к сдвиговым деформациям по границе областей I и II, описывается выражением

$$\int_{S_p} \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} |\Delta v| dS = \frac{\pi \sigma_s B}{3\sqrt{3}} (2R^3 - 3R^2 + 1).$$
(123)

Мощность объемной деформации в области II определяется следующим образом.

Скорость объемной деформации

$$\xi_V^{II} = \xi_\rho^{II} + \xi_\theta^{II} + \xi_z^{II} = Atg\beta - B\frac{3\rho - 1}{\rho}.$$

Поскольку рассматриваются тонкостенные втулки, допустимо усреднить скорость объемной деформации по толщине стенки

$$\xi_{V \text{cp}}^{II} = Atg\beta - \frac{5R - 1}{2R}B.$$

Абсолютное значение усредненной скорости

$$\left|\xi_{V \text{cp}}^{II}\right| = -Atg\beta + \frac{5R - 1}{2R}B.$$

Усредненная скорость объемной деформации связана с величиной деформации соотношением:

$$\xi_{V \text{cp}}^{II} = \frac{d\varepsilon_V^{II}}{dt} \approx \frac{\Delta \varepsilon_{V \text{cp}}^{II}}{\Delta t} \approx \frac{\Delta \varepsilon_{V \text{cp}} \overline{v}_0}{\Delta \overline{h}_k} = \frac{\Delta \varepsilon_{V \text{cp}}^{II}}{\Delta h}$$

где  $\Delta \overline{h}_k$  – высота конического участка матрицы,

$$\Delta \varepsilon_{V \text{cp}}^{II} = \left| \xi_{V \text{cp}}^{II} \right| \Delta h = \left( -Atg\beta + \frac{5R - 1}{2R} B \right) \Delta h.$$
(124)

Мощность объемной деформации в области II

$$\int_{V^{II}} \sigma_0 \xi_{V c p}^{II} dV = \frac{\pi \sigma_0 (R-1) (R^2 + R - 2)}{3tg\beta} \left( -Atg\beta + \frac{5R-1}{2R}B \right).$$
(125)

Скорость объемной деформации в области I

$$\left|\xi_{V}^{I}\right| = \left|D + \frac{A(\rho - R)}{h}\right|.$$

Усредненное значение скорости

$$\left|\xi_{V_{\rm cp}}^{I}\right| = \frac{B(R-1)ctg\beta - 1}{h} - \frac{A(1-R)}{2h}$$

Мощность объемной деформации в области І

$$\int_{V^{I}} \sigma_{0} \xi_{V}^{I} dV = -\left[ B(R-1)ctg\beta - 1 + \frac{A(1-R)}{2} \right] \pi \sigma_{0} R^{2} h.$$
(126)

Приращение объемной деформации за время Δt в области I

$$\Delta \varepsilon_V^I = \left[ -\frac{B(R-1)ctg\beta - 1}{h} - \frac{A(1-R)}{2h} \right] \Delta h.$$
 (127)

После подстановки выражений (117) – (123), (125), (126) в (116) и решения вариационной задачи получена система линейных уравнений относительно варьируемых параметров *A* и *B*:

$$\begin{array}{c} a_{1}B + a_{2}A + a_{0} = 0, \\ b_{1}B + b_{2}A + b_{0} = 0, \end{array} \right\}$$
(128)

где

$$\begin{aligned} a_{1} &= \frac{\chi(R-1)^{2}}{tg\beta} + \frac{4\pi\sigma_{s}}{3\sqrt{6}B_{cp}}\sqrt{(R\ln R - R + 1)(R-1)(R^{2} + R - 2)}; \\ a_{2} &= \lambda - \frac{\pi\sigma_{s}(R-1)^{2}tg\beta}{3\sqrt{6}B_{cp}}\sqrt{\frac{(R-1)(R^{2} + R - 2)}{R\ln R - R + 1}}; \\ a_{0} &= \frac{3\lambda(1-R^{2})}{3R - 2 - R^{3}} - \frac{\pi\mu\sigma_{s}(R-1)^{2}(2R+1)}{3\sin\beta\cos\beta} - \pi\sigma_{0}R^{2}h(R-1) - \\ &- \frac{\pi\mu\sigma_{s}(R-1)^{2}}{tg\beta} - \frac{\pi\sigma_{0}(R-1)(5R-1)(R^{2} + R - 2)}{6R} + \\ &+ \frac{\pi\sigma_{s}(2R^{3} - 3R^{2} + 1)}{3\sqrt{3}}tg\beta - \pi\sigma_{s}h\mu(R^{2} - 1); \end{aligned}$$

$$b_{1} = \frac{\lambda}{tg\beta} - \frac{\pi\sigma_{s}(R-1)^{2}}{3\sqrt{6}B_{cp}} \sqrt{\frac{(R-1)(R^{2}+R-2)^{3}}{R\ln R-R+1}};$$

$$b_{2} = \frac{\chi h^{2}}{4} + \frac{\pi\sigma_{s}(2tg^{2}\beta+1,5)}{9\sqrt{6}B_{cp}tg\beta} \sqrt{\frac{(R-1)^{3}(R^{2}+R-2)^{3}}{R\ln R-R+1}} + \frac{\pi\sigma_{s}h(R^{4}-6R^{2}+8R-3)}{9[B_{cp}(R-1)ctg\beta-1]};$$

$$b_{0} = -\frac{\lambda}{R-1} - \frac{\pi\mu\sigma_{s}(R-1)^{2}}{tg\beta} - \pi\mu\sigma_{s}h(R-1) - \frac{\pi R^{2}h\sigma_{0}(1-R)}{2} - \frac{\pi\sigma_{0}(1-R)(R^{2}+R-2)}{3};$$

$$\chi = \frac{2\pi\sigma_s (R^2 - 1)}{3[B_{\rm cp} (R - 1)ctg\beta - 1]}; \quad \lambda = \frac{2\pi\sigma_s (R - 1)(3R - 2 - R^3)}{9[B_{\rm cp} (R - 1)ctg\beta - 1]}.$$

Из решения системы уравнений (128) определены параметры и :

$$A = \frac{a_0 b_1 - a_1 b_0}{a_1 b_2 - a_2 b_1}; \quad B = -\frac{a_0 + a_2 A}{a_1}.$$

Входящая в выражения для вычисления  $a_1, a_2, a_0, b_1, b_2, b_0$  величина  $B_{cp}$  определена следующим образом.

Поскольку в случае равномерной деформации  $A = 0, B = B_{cp}$ , выражения (125) и (127) принимают вид, соответственно,

$$\Delta \varepsilon_V^{II} = -\frac{B_{\rm cp}(5R-1)}{2R} \Delta h , \qquad (129)$$

$$\Delta \varepsilon_V^I = \frac{B_{\rm cp} (R-1) ctg\beta - 1}{h} \Delta h \,. \tag{130}$$

Поскольку весь процесс деформирования рассматривается как состоящий из совокупности этапов, происходящих за малые промежутки времени  $\Delta t$ , то при определении объемных деформаций используются не логарифмические деформации, а относительные:

$$\varepsilon_{V_i} = \frac{V_i - V_{0i}}{V_{0i}}.$$

С помощью последнего выражения и формул (129), (130) определено изменение объема в областях I и II в процессе формования за время  $\Delta t$ :

$$\Delta V^{I} = V^{I} - V_{0}^{I} = \Delta \varepsilon_{V}^{I} \cdot V_{0}^{I},$$
  
$$\Delta V^{II} = V^{II} - V_{0}^{II} = \Delta \varepsilon_{V}^{II} \cdot V_{0}^{II},$$

Суммарное изменение объема

$$\Delta V_{\Sigma} = \Delta V^{I} - \Delta V^{II} = \Delta \varepsilon_{V}^{I} \cdot V_{0}^{I} + \Delta \varepsilon_{V}^{II} \cdot V_{0}^{II}.$$

С другой стороны, суммарное изменение объема

$$\Delta V_{\Sigma} = V_{\Sigma} - V_0 = \pi \left( R^2 - 1 \right) \Delta h^{-1}$$

Из сравнения последних двух выражений определено:

$$B_{\rm cp} = \frac{6(R+1) tg\beta}{3(R^2 - 1) + \frac{5R - 1}{2R}(R^2 - R - 2)}.$$
 (131)

Средняя плотность изделия

$$\gamma_{\rm cp} = \frac{1}{V^I + V^{II}} \left( \int_{V^I} \gamma^I dV + \int_{V^{II}} \gamma^{II} dV \right).$$

Сила деформирования определена из равенства мощностей внутренних и внешних сил:

$$\int_{V^{I}} \sigma_{i}\xi_{i}dV + \int_{V^{II}} \sigma_{i}\xi_{i}dV + \int_{V^{I}} \sigma_{0}\xi_{V}dV + \int_{V^{II}} \sigma_{0}\xi_{V}dV + \int_{V^{II}} \sigma_{0}\xi_{V}dV + \int_{V^{II}} \frac{\sigma_{s}}{\sqrt{3}} |\Delta v| dS = \int_{F_{k}} |q_{N}| |v_{N}| dF + \int_{F_{k}^{I}} |\Delta v_{\tau}^{I}| |\tau| dF + \int_{F_{k}^{II}} |\Delta v_{\tau}^{II}| |\tau| dF + \int_{F_{k}^{II}} |\Delta v_{\tau}^{II}| |\tau| dF - \int_{F_{k}^{II}} |\Delta v_{\tau}^{I}| |\tau| dF$$

$$(132)$$

где  $q_N$  – удельная сила, действующая по нормали к конической поверхности матрицы;  $v_N$  – компонента скорости перемещения матрицы, нормальная к ее конической поверхности.

Сила  $P_N$ , действующая на коническую поверхность матрицы в направлении оси z, определяется как проекция на эту ось силы, нормальной к конической поверхности,

$$P_N = \int_{F_R II} \left| q_N \right| v_N \left| dF \right|$$

Для взятия интегралов в выражении (132) использовано неравенство В.Я. Буняковского:

$$\left[\int_{a}^{b} f(x)\varphi(x)dx\right]^{2} \leq \int_{a}^{b} [f(x)]^{2} dx \int_{a}^{b} [\varphi(x)]^{2} dx,$$

в котором знак заменен на равенство, т.е. принято крайнее значение. Применительно к входящим в выражение (132) интегралам последнее неравенство записывается в виде:

$$\int_{V} \sigma_i \xi_i dV \le \sigma_i \sqrt{V \int_{V} \xi_i^2 dV}.$$

В результате мощность сдвиговой деформации для области I

$$\int_{V^{I}} \sigma_{i} \xi_{i} dV = \frac{\sqrt{2}\pi \sigma_{s} \bar{r}^{2}}{3} \sqrt{h(R^{2} - 1)[2D^{2}(R^{2} - 1)h + \cdots]}$$

$$\xrightarrow{\dots \rightarrow \frac{(R^{2} - 1)A^{2}h}{2} + \frac{4AD(3R - 2 - R^{3})}{3} + \frac{(133)}{3}$$

$$\xrightarrow{\dots \rightarrow \frac{A^{2}}{12}(R^{4} - 6R^{2} + 8R - 3)}$$

Мощность сдвиговой деформации для области II

$$\int_{V^{II}} \sigma_i \xi_i dV = \frac{2\pi\sigma_s \bar{r}^2}{3\sqrt{3}tg\beta} \sqrt{(R-1)(R^2+R-2)[2B^2(B\ln R-R+1)-\dots]} \longrightarrow (134)$$

$$\dots \rightarrow \frac{1}{-AB(R-1)^2 tg\beta + A^2 (2tg^2\beta + 1,5)(R^3 - 3R + 2)/6}$$

Для определения силы  $P_N$  проведена подстановка выражений (119) – (123), (125), (126), (133) и (134) в выражение (132).

Сила формования втулки определена как сумма силы  $P_N$  и составляющих от сил трения, действующих по конической и цилиндрической (радиусом R) поверхностям матрицы:

$$P = P_N + \frac{\pi\mu\sigma_s(R-1)(R^2 + R - 2)\overline{r}^2\cos\beta}{3tg\beta} + 2\pi R\sigma_s h\mu\overline{r}^2.$$
 (135)

### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Удельная сила деформирования

$$q = \frac{P}{\pi (R^2 - 1)} \,. \tag{136}$$

При расчете удельной силы по формулам (132), (135), (136) принималось, что за достаточно малый промежуток времени, которому соответствует приращение рабочего хода  $\Delta h$ , напряжение текучести материала и средняя плотность заготовки остаются постоянными.

Удельную силу, действующую на пуансон, определяли как отношение силы формования к площади сечения пуансона.

В качестве примера, на рис. 4.47–4.49, приведены результаты расчета удельной силы формования в зависимости от плотности, угла конусности и относительной толщины стенки втулки из железного порошка ПЖВ2.160.28. Здесь сплошные кривые – расчет, штриховые – эксперимент.

Высота зоны 1 до начала формования  $h_0 = 20$  мм. Плотность засыпки порошка  $\gamma_0 = 4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

При расчете приращение хода  $\Delta \overline{h}$  принято равным 1,8 мм, плотность детали в процессе штамповки определяли из выражения:  $\gamma = \gamma_0 \exp(\varepsilon_0)$ .

Задачей описанного ниже исследования являлось определение распределения плотности, твердости и прочности по меридиональному сечению формованных предложенным способом втулок из железного порошка, имеющих коническую внешнюю поверхность.





Рис. 4.47. Удельные силы формования втулки при  $\beta = 8^{\circ}$ , R = 1,6: кривая  $l - \mu = 0,1$ ;  $2 - \mu = 0,3$ ;  $3 - \mu = 0,5$ 



Относительная плотность во втулках определена следующим образом. Из втулок вырезаны кольцевые элементы высотой 2 мм, имеющие средний

относительный радиус внешней поверхности  $R = \frac{R}{r}$  (см. рис. 4.50).

Для определения средней относительной плотности элемента проведено его взвешивание в дистиллированной воде и на воздухе. По разнице между результатами взвешивания, с учетом плотности воды, определена относительная плотность элемента  $\gamma$ .





Рис. 4.49. Удельные силы формования втулки с плотностью  $\gamma = 7$  г/см<sup>3</sup> при  $\mu = 0,3; 1 - \beta = 60, 2 - \beta = 80, 3 - \beta = 100$ 

Рис. 4.50. Обозначения размеров конической втулки

Для контроля механических характеристик у таких тонкостенных деталей, как изготавливаемые втулки, традиционные методы, при которых требуется вырезать из детали стандартные образцы на растяжение, на ударную вязкость, являются неприемлемыми. Поэтому для оценки прочности тонкостенных порошковых деталей применится формула (88).

В эксперименте, проведенном для описания математическими моделями распределения плотности, твердости и прочности во втулках, показанных на рис. 4.50, приняты следующие факторы: относительный средний внешний радиус вырезанного из втулки кольцевого элемента  $R = \frac{\overline{R}}{\overline{r}}$ ; угол наклона образующей внешней поверхности втулки к оси симметрии  $\beta$ ; марка железного порошка  $X_i$ ; удельная сила формования q, определенная как частное от деления силы формования на площадь торцевой поверхности втулки (см. рис. 4.30). Уровни варьирования указанных факторов приведены в табл. 48.

№ опыта	X	R	β [град]	<i>q</i> [МПа]	γ [г/см <sup>3</sup> ]	HB
1	ПЖВ2.160.28	1,2	6	800	6,65	62
2	ПЖВ4.160.28	1,2	6	1200	6,7	65
3	ПЖВ2.160.28	1,4	6	800	6,21	77
4	ПЖВ4.160.28	1,4	6	1200	6.11	65
5	ПЖВ2.160.28	1,2	12	1200	7,51	86
6	ПЖВ4.160.28	1,2	12	800	6,47	74
7	ПЖВ2.160.28	1,4	12	1200	6,88	75
8	ПЖВ4.160.28	1,4	12	800	6,10	60

Табл. 48. Матрица плана и результаты эксперимента

Для описания распределения относительной плотности γ и прочности σВ по высоте втулки проведен многофакторный эксперимент с указанными выше факторами и уровнями их варьирования (табл. 48).

Полученные в результате эксперимента математические модели имеют следующий вид.

Для распределения плотности по высоте втулки:

$$\gamma \left[ \Gamma/cM^3 \right] = 8,\,64 - 0,46\,X - 2,5\,R + 0,05\,\beta + 0,0011\,q,\tag{137}$$

для распределения твердости по высоте втулки:

$$HB = 70,5 - 9X - 12,5R + 1,1\beta + 0,011q.$$
 (138)

С использованием зависимости (88) между пределом прочности и твердостью и модели (138) получена модель распределения предела прочности по высоте втулки:

$$\sigma_{\rm p}[{\rm M}\Pi{\rm a}] = 193 - 49.4 \, X - 68.6 \, R + 5.96 \, \beta + 0.062 \, q. \tag{139}$$

На основании математических моделей (137) и (139) построены графики распределения плотности и предела прочности в зависимости от относительного радиуса внешней поверхности втулки *R*, угла β и марки железного порошка при удельной силе формования 1200 МПа, приведенные, соответственно, на рис. 4.51 и 4.52.

Анализ модели (137) указывает направление, в котором необходимо изменять исследованные параметры технологического процесса, чтобы изготовить деталь с наибольшей плотностью. С помощью опытов в этом направлении определили давление, необходимое для формования тонкостенной втулки из порошка ПЖВ2,160.28 с размерами (см. рис. 4.53):  $\beta = 6^{\circ}$ ;  $r = r_1 = 10$  мм; H = 50 мм.

Характер распределения плотности по высоте показан на рис. 4.53, прямая 3. При формовании втулки более сложной конфигурации, имеющей ступенчатую внутреннюю поверхность, эпюра распределения плотности отличается от линейной, а именно: имеет место интенсивно уплотненный участок непосредственно под ступенью.



Рис. 4.51. Распределение плотности по высоте конической втулки. Удельная сила формования q = 1200 МПа, прямые l, 2, 3 - для втулок из порошка ПЖВ2.160.28; 4, 5, 6 - для втулок из порошка ПЖВ4.160.26; прямые l и  $4 - для \beta = 6^{\circ}$ ; 2 и 5 для  $\beta = 10^{\circ}$ ; 3 и  $6 - для \beta = 12^{\circ}$ 



**Рис. 4.52.** Распределение прочности по высоте конической втулки. Удельная сила формования q = 1200 МПа, прямые l, 2, 3 - для втулок из порошка ПЖВ2.160.28; 4, 5, 6 - для втулок из порошка ПЖВ4.160.26; прямые l и  $4 - для \beta = 6^{\circ}$ ; 2 и 5 для  $\beta = 10^{\circ}$ ; 3 и  $6 - для \beta = 12^{\circ}$ 

### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

На рис. 4.53 (кривая 2) показана эпюра распределения плотности во втулке из порошка ПЖВ4.160.28 со ступенчатой полостью (r = 10 мм;  $r_1 = 12$  мм;  $\beta = 6^\circ$ ; H = 50 мм, а прямая 1 соответствует распределению плотности в такой же втулке, но без ступени ( $r = r_1 = 10$  мм).



Рис. 4.53. Распределение плотности во втулках, показанных на рис. 4.25

Путем измерения твердости в отдельных точках изготовленных втулок (см. рис. 4.45) и вычисления по зависимости (88) значений предела прочности в этих точках определили, что у этих втулок в тонкостенной части предел прочности равен 268 МПа, в толстостенной – 232 МПа.

Приведенные на рис. 4.45 порошковые детали сложной формы имеют настолько гладкую поверхность, что их желательно рассматривать как нуждающиеся только в спекании в защитной или восстановительной атмосфере и не требующие дополнительных формоизменяющих операций.

**При спекании** в большинстве случаев наблюдается увеличение плотности и уменьшение объема спекаемых порошковых тел [42]. В зависимости от скорости протекания усадки весь процесс уплотнения порошковых тел можно условно разделить на три стадии. На первой, начальной стадии спекания, скорость усадки наиболее высокая. Происходит быстрое сокращение объема пор. Кинетика уплотнения в основном определяется явлениями, происходящими в приконтактных областях между частицами, и зависит от их структурного состояния и геометрии.

На второй стадии скорость усадки замедляется. Уплотнение порошкового тела идет во всем его объеме. Тело ведет себя как вязкая среда с соответствующим коэффициентом вязкости. На третьей стадии спекания усадка и повышение плотности порошковых тел незначительны. В структуре имеются отдельные изолированные остаточные поры. О конечной усадке при спекании говорить нельзя, так как при повторном спекании брикетов вновь обнаруживается усадка. Механизм усадки при спекании заключается в объемной деформации частиц под влиянием поверхностного натяжения. Осуществляется она путем объемной самодиффузии атомов (заполнением вакансий). При этом коэффициент самодиффузии изменяется во времени вследствие уменьшения первоначальной повышенной концентрации дефектов кристаллической решетки.

Как и упругое последействие (см. п. 4.4.), усадку при спекании необходимо учитывать при расчете и конструировании штампового инструмента. Увеличение плотности при спекании больше у брикетов, формованных при меньших давлениях.

С целью получения заданных размеров, спеченные порошковые изделия подвергают **калиброванию**. Также калиброванием повышают некоторые свойства деталей. При калибровании порошковых деталей происходит пластическая деформация отдельных их частей.

## 5. КОНСТРУИРОВАНИЕ ШТАМПОВ ДЛЯ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ И РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРЕССОВ

## 5.1. Конструирование штампов для закрытой прошивки стальных и спеченных порошковых заготовок на универсальных прессах

Для холодной объемной штамповки на ряде предприятий применяют универсальное оборудование – традиционные кривошипные и гидравлические прессы, которые не обеспечивают надежного направления ползуна и имеют относительно большие столы малой жесткости.

Для работы на таких прессах в работе [48] намечены пути совершенствования направляющих устройств, выполненных в виде колонок и втулок у штампов для ХОШ деталей типа стаканов. Уделено внимание выбору мест расположения колонок и втулок. Отмечается, что известно два способа расположения направляющих колонок: в нижней плите (рис. 5.1, a) и в верхней (рис. 5.1, b).



**Рис. 5.1.** Схемы штампов с расположением колонок в нижней  $(a, \delta)$  и верхней (b) плитах: a – исходное состояние;  $\delta$ , b – после перекоса верхней плиты

Зазоры в направляющих ползуна пресса, как правило, имеют значительно большую величину, по сравнению с зазорами между колонками и направляющими втулками штампа. Под действием системы сил и моментов, приложенных к ползуну пресса во время рабочего хода, ползун наклоняется вместе с верхней плитой штампа. При этом центром наклона верхней плиты штампа можно считать точку О – середину линии AB, проведенной между центрами направляющих втулок (рис. 5.1,  $\delta$ ).

Минимальный угол наклона верхней плиты  $\varphi$  определяется исходя из высоты направляющих втулок Е и зазора С в направляющих втулках:  $\varphi_{\text{мин}} = \arcsin(C/E)$ . Если предположить, что наклон ползуна приводит и к изгибу колонок, то  $\varphi = \varphi_{\text{мин}} + \varphi_{\text{изг}}$ . При перекосе верхней плиты на угол  $\varphi$  головка пуансона получает горизонтальное смещение еп, пропорциональное длине пуансона *H*:  $e_n = H\varphi$ .

Наклон плиты с ползуном происходит во время перехода кривошипа пресса через крайнее нижнее положение при действии деформирующей заготовку номинальной силы Р... При этом головка пуансона жестко зафиксирована в теле прошиваемой заготовки, и перемещение еп не осуществляется. Следовательно, должен возникать такой изгиб пуансона, при котором его прогиб составляет еп. Очевидно, что прогиб вызывает существенное снижение долговечности пуансона. Из анализа рис. 5.1 следует, что уменьшение изгиба пуансона возможно путем уменьшения зазора С, увеличения высоты направляющей втулки Е и укорочения пуансона Н. Последний путь исключается, так как длина пуансона определяется размерами изготавливаемой закрытой прошивкой детали. Уменьшить расстояние от головки пуансона до линии AB не удается из-за необходимости разметить пуансонодержатель и закаленную прокладку под опорным торцом пуансона. Возможности первого из указанных трех путей уменьшения изгиба пуансона ограничены, поскольку зазоры менее 0,05 мм нельзя допускать из-за заклинивания между направляющими колонками и втулками, происходящего вследствие теплового расширения нижней части штампа. Следовательно, снизить изгибающие нагрузки на пуансон возможно только путем увеличения длины поверхности сопряжения колонок и втулок до значения, равного 2,0...2,5 диаметра колонки.

В работе [48] подводится итог, что более эффективным путем уменьшения изгибающих нагрузок на пуансон, обусловленных наклоном верхней плиты штампа с ползуном, является расположение направляющих колонок в верхней плите, а втулок – в промежуточной (рис. 5.1, *в*). Как видно из схемы, при перекосе верхней плиты на тот же угол фмин смещение головки пуансона намного меньше, чем ее смещение при закреплении колонок в нижней плите штампа.

В работе [49] показано, что штампы для ХОШ испытывают большие сосредоточенные на их оси нагрузки, связанные с высокими удельными силами деформирования заготовок. Силы от рабочего инструмента передаются на плиты штампа, на ползун и стол пресса. В результате в штампах с двумя плитами возникают прогибы плит и, как следствие, наклоны направляющих колонок, рис. 5.2, *а*. В результате таких деформаций и износа пары колонка-втулка возможно нарушение соосности пуансона и матрицы и, как следствие, ухудшение качества изделий и существенное снижение сопротивления пуансона усталости.

В рассматриваемой работе, так же, как и в работе [48], рекомендована конструктивная схема штампа с тремя плитами. В штампе рекомендованной конструкции (рис. 5.2,  $\delta$ ) в верхней плите l закреплен пуансонодержатель с пуансоном 2. Также в верхней плите установлены направляющие колонки 3, контактирующие с направляющими втулками, установленными в промежуточной плите 4. В промежуточной плите установлена бандажированная матрица 5, которая через подкладную втулку опирается на нижнюю плиту штампа 6. Нижняя и промежуточная плиты соединены между собой болтами 7. Болты удерживают промежуточную плиту от подъема на этапе выталкивания штампованной детали из матрицы. При такой конструкции штампа, хотя нижняя плита подвержена значительным деформациям, направляющие колонки и втулки не испытывают деформаций, поскольку изгиб нижней плиты не передается средней плите.



Рис. 5.2. Схемы деформирования штамповых плит и направляющих колонок штампов ХОШ

Высокая эффективность использования штампа с тремя плитами апробирована авторами данной монографии в конструкции штампа, разработанного еще до опубликования работ [48, 49] и приведенной на рис. 5.3 [1, 5].

На этом рисунке показана схема штампа, фотография которого была приведена ранее на рис. 2.11. Из совместного рассмотрения рис. 2.11 и рис. 5.3 следует, что на рис. 5.3 слева от вертикальной оси дан разрез штампа вдоль коромысла, на которое опирается выталкиватель детали из матрицы, а справа от оси – разрез в перпендикулярном коромыслу направлении. В приведенном на рис. 5.3 штампе пуансон 3, осуществляющий закрытую прошивку заготовки, установлен в пуансонодержателе 2, зафиксированном в верхней плите *1* на оси штампа. Плита *1* закреплена на ползуне пресса.



Рис. 5.3. Конструкция производственного штампа

Двухбандажная матрица 4 размещена в обойме 5 и имеет возможность осевого перемещения между опорной плитой 7 и ограничительной гайкой, ввинченной сверху в обойму 5 (так называемая, плавающая матрица). Обойма 5 размещена строго соосно с пуансонодержателем 2, в средней плите 6 штампа. Соосность пуансонодержателя 2 и обоймы 5 при работе штампа обеспечивают направляющие колонки 12, установленные в верхней плите, и направляющие втулки, установленные в средней плите штампа. При этом направляющие втулки имеют большую высоту E, показанную на рис. 5.1.

Штамп на рис. 5.3 предназначен для закрытой прошивки заготовок, формованных и спеченных из порошка на железной основе. При этом требуется (см. рис. 4.10), чтобы плавающая матрица имела возможность на начальном этапе закрытой прошивки помещенной в матрицу заготовки перемещаться в направлении движения пуансона 3. Для этого под нижним торцом матрицы установлены показанные на рис. 5.3 пружины. Суммарная сила пружин не должна позволить матрице при загрузке в нее заготовки опуститься под действием собственной тяжести в нижнее положение. Значительных силовых функций эти пружины не выполняют.

Размещенная в матрице 4 заготовка опирается через выталкиватель 9 на закаленную прокладку в нижней плите штампа 8. Выталкиватель 9 представляет собой единую деталь, имеющую участок с увеличенным диаметром, контактирующий с коромыслом 10. Назначение участка с увеличенным диаметром – передать от коромысла 10 выталкивающую силу на нижний торец изготовленной закрытой прошивкой детали. Выталкиватель

9 изготавливают из такой же инструментальной стали, как и пуансон 3, и подвергают такой же термической обработке. Под нижним торцом выталкивателя в плите 8 размешена закаленная на высокую твердость (такую же, как и у выталкивателя) прокладка, размеры которой определяются так же, как описано выше в п. 2.3. В указанном пункте даны комментарии по расчету размеров коромысла, которые справедливы и для штампа на рис. 5.2. Подчеркнем, что тщательность расчетов при конструировании коромысла и опоры выталкивателя очень важны для обеспечения работы штампа для XOIII. Подъем коромысла выталкивателя осуществляется тягами 11, размещенными внутри направляющих колонок 12.

Отметим, что штамповое пространство и рабочий ход пресса марки PKZ-250 (Германия), для которого разработан описываемый штамп, позволяли штамповать детали большей высоты, чем у деталей, размеры которых приведены выше, в п.1.3, см. табл. 1. Поэтому, чтобы обеспечить нужную закрытую высоту штампа, соответствующую нижней мертвой точке ползуна пресса, пуансонодержатель 2 штампа на рис. 5.3 имеет завышенную высоту. При этом длина пуансона H (см. рис. 5.1) не завышена.

Съем детали с пуансона осуществляется съемником 13 консольной конструкции. Направляющая втулка съемника подпружинена в направлении рабочего хода пуансона 3, чтобы при возвратном ходе пуансона обеспечить достаточное расстояние между верхним торцом матрицы и нижним торцом съемника, необходимое для извлечения изготовленной детали. При этом, величину хода пружины съемника выбирают такой, чтобы после извлечения из штампа изготовленной детали съемник остался в поднятом состоянии и не мешал укладке в матрицу новой заготовки.

При конструировании пуансона и пуансонодержателя штампа для холодной закрытой прошивки заготовок авторы данной монографии предлагают применять описанные ниже технические решения. Рациональная конструкция пуансонодержателя приведена на рис. 5.4.

Пуансон 2 опирается на закаленную прокладку 3. На посадочную часть пуансона одета промежуточная втулка 4, сопряженная по посадке без гарантированного зазора с обоймой 5. Перечисленные элементы зафиксированы в обойме 5 гайкой 1. Снаряженная обойма установлена без гарантированного зазора в верхней плите штампа или, как будет показано ниже, в п. 5.3, в штоке специализированного пресса. Ниже пуансонодержателя на рис. 5.4 тонкими линиями показана обрезанная волнистой линией стержневая часть пуансона, расположенная в полости также обрезанной волнистой линией бандажированной матрицы. Над верхним торцом матрицы размещено кольцо 8 с двумя радиально направленными прорезями, в которых перемещаются в радиальном направлении съемники 6 для съема изготовленной детали с пуансона. Съемники перемещают с помощью ручек 7.

Ниже приведены рабочие чертежи пуансона и элементов пуансонодержателя, входящих в показанный на рис. 5.4 сборочный чертеж.



Рис. 5.4. Конструкция пуансонодержателя штампа для XOШ стаканов закрытой прошивкой цилиндрических заготовок

Рабочий чертеж пуансона приведен на рис. 5.5. Пуансон изготавливают из быстрорежущих сталей Р6М5, Р9, Р18 или их безвольфрамового аналога – стали ЭП761 и термообрабатывают на твердость, указанную на чертеже. Головку рабочей части пуансона карбонитрируют, чтобы уменьшить ее истирание в процессе штамповки.



При конструировании пуансона, особенно при большой длине его стержневой части (на данном чертеже имеющей размер ø45<sub>-0,1</sub>), возникает проблема с назначением разницы в диаметрах этой стержневой части и калибрующего пояска головки пуансона (на данном чертеже имеющего размер ø45,65<sub>-0.05</sub>). Проблема состоит в том, что даже закаленная на указанную

твердость стержневая часть пуансона в начале его работы при удельной силе 2500 МПа получает пластическую деформацию, и ее диаметр увеличивается. При большой длине пуансона на увеличение диаметра его стержневой части влияет также его упругая деформация при прошивке заготовки. Нельзя допустить, чтобы увеличившийся вследствие этих деформаций диаметр стержневой части достиг диаметра калибрующего пояска пуансона. В этом случае прошитая и уже не находящаяся в пластическом состоянии трубная часть заготовки будет охватывать по посадке с натягом увеличившуюся в диаметре стержневую часть пуансона. Это приведет к увеличению удельной силы, действующей на головку пуансона и, как следствие, к снижению сопротивления пуансона усталости.

Назначение при конструировании заниженного диаметра стержневой части пуансона, так же, как при завышенном ее диаметре, приводит к увеличению удельной силы в стержневой части пуансона. Как следствие, к снижению сопротивления пуансона усталости. Напомним, что удельная сила равна силе штамповки, деленной на площадь поперечного сечения пуансона.

При радиальном шлифовании стержневой части изготавливаемого пуансона используют фальш-центры, которые позже, перед шлифованием торцевых частей пуансона, удаляют. Провести корректирующее радиальное шлифование, чтобы удалить образовавшуюся в начале эксплуатации пуансона бочкообразность стержневой части не представляется возможным из-за отсутствия центров, с помощью которых пуансон устанавливался в шлифовальном станке. Поэтому устранить бочкообразность можно только обтачиванием стержневой части пуансона эльборовым резцом. В предположении такой технологии, на диаметр стержневой части пуансона на чертеже назначен не очень высокий квалитет шероховатости поверхности. Эта поверхность после ее обтачивания не будет соприкасаться с поверхностью прошитой полости детали. Для обеспечения приемлемого с технико-экономических позиций сопротивления пуансона усталости наиболее важно, чтобы на его стержневой части отсутствовали следы обработки в виде рисок в окружном направлении.

Над верхним торцом пуансона устанавливают прокладку, обозначенную позицией *3* на рис. 5.4. Рабочий чертеж прокладки приведен на рис. 5.6. К показанному на рис. 5.5 пуансону относится прокладка с размерами, указанными в первой строке таблицы на рис. 5.6.

Назначение прокладки – гарантированно не допустить пластической деформации в верхней незакаленной плите штампа при действии удельной силы 2500 МПа на уровне головки пуансона. Прокладка отделяется от тела пуансона в качестве автономной детали, чтобы уменьшить отход дорогостоящей стали, который имел бы место, если бы пуансон изготавливался как единое целое с его опорной частью, совпадающей с размерами прокладки. Кроме того, чтобы повысить качество термообработки пуансона благодаря отсутствию больших перепадов его диаметра, которые имели бы место, если бы пуансон составлял единое целое с прокладкой. Также, чтобы сэкономить средства при смене инструмента, поскольку прокладки меняются реже, чем производится замена пуансонов. При этом прокладка может быть изготовлена из менее дорогостоящей стали, чем пуансон. Высказанные соображения не снижают строгости требований к качеству прокладок, поскольку малейшая пластическая деформация плиты штампа выше верхнего торца прокладки, понизит сопротивление пуансонов усталости и качество изготавливаемых штампованных деталей. Подчеркнем важность обеспечения большой толщины прокладок.



Рис. 5.6. Прокладка над верхним торцом пуансона

Рабочий чертеж промежуточной втулки 4, одеваемой на посадочную часть пуансона (см. рис. 5.4) приведен на рис. 5.7.

В конструкции втулки важны допуски на размеры, задающие диаметры ее внутренней и внешней цилиндрических поверхностей. Эти допуски определяются посадками H7/h6 направляющей части пуансона во втулке и втулки в обойме 5 (см. рис. 5.4). В связи с такими посадками без гарантированного зазора выход воздуха из обоймы 5 затруднен, и введение пуансона с надетой на его направляющую часть втулкой будет происходить замедленно. Для обеспечения выхода воздуха на направляющей втулке предусмотрена проточка, показанная в сечении A-A чертежа на рис. 5.7.



Рис. 5.7. Втулка направления пуансона

Рабочий чертеж обоймы пуансонодержателя (см. поз. 5 на рис. 5.4) приведен на рис. 5.8. Размеры обоймы, применяемой в пуансонодержателе, приведены в верхней строке таблицы на этом рисунке. Размер *d* приведен со значением допуска H7. Пуансон с его направляющей втулкой фиксируются в пуансонодержателе с помощью накидной гайки, чертеж которой приведен на рис. 5.9. Размеры гайки (см. поз. *l* на рис. 5.4), применяемой в пуансонодержителе, приведены в верхней строке таблицы на рис. 5.9.

Выше, на рис. 5.5, приведен пуансон для прошивки очень глубокой полости в заготовке. Для закрытой прошивки более распространенных деталей с менее глубокими полостями применяют пуансоны меньшей длины. Чертеж такого пуансона приведен на рис. 5.10 [1].

Величина угла конусности 2 $\alpha$  рабочей части пуансона зависит от относительной толщины стенки изготавливаемой детали. Этот угол принимают в пределах от 90° до 150°. Нижняя граница указанного диапазона относится к толстостенным деталям, а верхняя граница – к тонкостенным. Величина  $d_1 = (0,2 \dots 0,5)d$ . Значение  $d_1 = 0,2d$  применяют при угле конусности рабочей части пуансона, равной 150°, т.е. при штамповке тонкостенных деталей, а значение  $d_1 = 0,5d$  применяют при угле конусности рабочей части пуансона, равной 150°, т.е. при штамповке толстостенных деталей.





Обозначение	d	dı	d2	D	D2	h	h,	H	Кал
	90'ea	M120×2.5-6g	150	120-9022	180-94	80	65	120	1
	(30+0,94	MI60×2.5·6g	190	160_0,025	220-q+6	100	85	140	1.

Неуказанные пред. отк. размеров: отв.- по 44, валов - по h4, остальных – ± 1744

Рис. 5.8. Обойма пуансонодержателя



Обозначение	d1	d	D	Kas.	
	80	M120x2.5-7H	140	1	
1	100	M160x2.5-7H	180	1	

Неуказанные предельные отклонения размеров: отверстий—по H14, валов—по h14, остальных—± <u>I114</u>

Рис. 5.9. Гайка крепления пуансона в пуансонодержателе



Рис. 5.10. Наиболее распространенная конструкция пуансона для штамповки заготовок закрытой прошивкой

Форма рабочей части пуансона в виде усеченного конуса объясняется стремлением, используя плоскую площадку, повысить площадь участка, удерживающего первоначально нанесенный на торец заготовки смазочный материал, слой которого растягивается на всю площадь боковой поверхности прошиваемой полости. Коническая форма рабочей части пуансона связана со стремлением соответствовать естественными линиями течения металла заготовки. Совпадение формы пуансона с этими линиями естественного течения позволяет уменьшить силу закрытой прошивки и повысить качество изделия. Указанные выше комбинации размеров позволяют наилучшим образом решить две указанные задачи.

Остальные размеры на рис. 5.10 имеют следующие значения:  $D_1 = 1,5d$ ; D = 2d; lk = (2 ... 3) мм;  $r_T = 0,1d$ ;  $r_1 = 0,2d$ ; h = (5 ... 15) мм;  $L_p = (1,5 ... 2,5)d$ ;  $L_n = (1,5 ... 2)$ ; z = (0,05 ... 0,15) мм;  $2\alpha_1 = 40 ... 60^\circ$ . Поскольку  $D_1$  превышает  $d_p$ , для обеспечения надежного удержания пуансона на оси штампа  $L_n$  должна быть не менее  $L_p$ . После начала использования пуансона для закрытой прошивки стальных заготовок может потребоваться корректировка его размера  $d_p$ , обтачиванием эльборовым резцом, как это уже обсуждалось выше при рассмотрении чертежа пуансона на рис. 5.5. Следы обтачивания в виде окружных рисок не допускаются.

Ниже рассмотрена конструкция бандажированной матрицы (рис. 5.11–5.16). Комплект чертежей бандажированной матрицы, как и для каждого проектируемого узла, начинается со спецификации (рис. 5.11).

[ω] Πο3.	Обозначевне	Наименование	о Колич.	Приме- чаяне 7
-		Документация		
_	ПАСТ-11-009СБ	Сборочный чертеж		
	- · · · .	Детали	_	-
Ī	ПАСТ-11-009/401	Вставка	Ţ	
2	11ACT - 11 -009/402	<u>Бандаж внутренний</u>	1	
$\frac{1}{4}$	TACT -11 -009/404	Бандаж наружный	$\frac{1}{1}$	
				1.
		Материалы		
_		Сталь ШХ 15 ГОСТ 801-60	59	ĸz
		Сталь 40х ГОСТ 4543-71	10,6	ĸe
		_ Cmanb X1201	-	
		<i>FOCT 5950-63</i>	285	ĸe
	I			1

Рис. 5.11. Спецификация сборочного чертежа бандажированной матрицы



Сборочный чертеж бандажированной матрицы приведен на рис. 5.12.

Рис. 5.12. Сборочный чертеж бандажированной матрицы

Поскольку вставка матрицы, непосредственно контактирующая с деформируемой заготовкой, должна иметь максимальную прочность и твердость, чтобы противостоять царапанию и истиранию ее рабочей поверхности, вставку изготавливают из высокопрочной инструментальной стали и закаливают на высокую твердость.

Рабочий чертеж вставки матрицы приведен на рис. 5.13.

Такая вставка матрицы не может противостоять растягивающим напряжениям, которые возникают в ней при деформировании заготовки. Чтобы противостоять растягивающим напряжениям во вставке матрицы, действующим в окружном направлении, во вставке создают постоянно действующее напряжение сжатия в этом направлении, превышающее по величине растягивающее напряжение, возникающее во время деформирования заготовки.

Постоянно действующее напряжение сжатия создают путем заключения вставки матрицы с существенным по величине натягом в бандаж или в систему бандажей (см. рис. 5.12).

Рабочие чертежи внутреннего, среднего и наружного бандажей матрицы приведены, соответственно, на рис. 5.14, 5.15 и 5.16.

При этом на внешней поверхности наружного бандажа окружное напряжение, возникающего при суммировании постоянно действующего растягивающего напряжения от натяга между вставкой и бандажом с растягивающим напряжением, действующим при деформировании заготовки во вставке матрицы, не должно превышать напряжения текучести материала бандажа с некоторым запасом прочности. Запас прочности, кроме указанной выше причины, предусматривает также, чтобы не происходил разрыв бандажа при хранении матрицы на стеллаже в перерывах между использованием матрицы для производства в ней штампованных деталей.



Рис. 5.13. Рабочий чертеж вставки бандажированной матрицы



Рис. 5.14. Рабочий чертеж внутреннего бандажа матрицы



Рис. 5.15. Рабочий чертеж среднего бандажа матрицы



Рис. 5.16. Рабочий чертеж внешнего бандажа матрицы

Чтобы удовлетворить в полной мере описанным выше требованиям, при однобандажной матрице приходится конструировать бандаж с большим диаметром его внешней поверхности. Даже при этом, выравнивание напряжений по диаметру бандажированной матрицы, имеющей один бандаж, происходит недостаточно плавно. Систему бандажей, как это показано в данном примере, предусматривают с целью создания более равномерных напряжений в бандажированной матрице при одновременном сокращении ее внешнего диаметра. Заметим, что твердости, на которые закаливают бандажи, последовательно уменьшаются от внутреннего бандажа к внешнему.

# 5.2. Конструирование штампов для формования полых осесимметричных порошковых деталей на универсальных прессах

Конструкции штампов к универсальным прессам, рассмотренные выше, в п. 5.1, применяемые для ХОШ заготовок из стального проката и спеченных заготовок из порошков на железной основе, достаточно привычны для специалистов в области обработки давлением.

При производстве деталей на универсальных прессах холодным формованием из порошковой шихты и последующим спеканием конструкции применяемых штампов значительно сложнее.

Примером является разработанный группой конструкторов под руководством Е.П. Добрякова штамповый блок к универсальному прессу, предназначенный для формования порошковых заготовок в серийном производстве (рис. 5.17). Изготавливаемая в этом блоке деталь показана на рисунке вверху, справа.

В этом блоке верхний пуансон 26 закреплен на плите 17, а матрица 27 установлена в посадочном отверстии подвижной плиты 16, связанной через направляющие колонки блока (на схеме не показаны) с нижним приводом пресса. Нижняя плита 2 через призмы 1 закреплена на столе пресса болтами 25. С этой плитой связана неподвижная промежуточная плита 8, на которой установлен неподвижный пуансон 28. Выше и ниже плиты 8 расположены подвижные промежуточные плиты 18 и 22, на которых установлены пуансоны 29 и 30. На подвижных промежуточных плитах также закреплены упоры 6 и 12, взаимодействующие в процессе формования с подвижными упорами 4 и 11, смонтированными на ползушках 5, 10. Ползушки перемещаются под действием клиновой системы 3, 7, 13, 15. Все плиты центрируются посредством направляющих втулок на направляющих колонках штампового блока.

Движение промежуточных плит осуществляется посредством упоров. Так, плита 18 перемещается вниз при взаимодействии резьбовой втулки 14, свободно перемещающейся по резьбовому упору 9, с подвижной плитой 16. Перемещение плиты 22 производится при взаимодействии указанного упора с плитой 16. Плита 22 перемещается вверх в результате взаимодействия упора 24 с подвижной плитой пресса, а плита 18 – с помощью упора 21, свободно перемещающегося в упоре 24, через демпфер 19.

Для изготовления равноплотной сложной заготовки, имеющей ступенчатую полость, необходимо провести наладку штампового блока.



Рис. 5.17. Штамповый блок к универсальному прессу, предназначенный для формования порошковых заготовок

В формованном виде деталь имеет высоты  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h_3$ . Посредством регулирующих элементов пресса и штампа устанавливается объем насыпной камеры, при этом размеры  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  выбирают из следующих соотношений:

$$H_1 = h_1 k; H_2 = h_2 k; H_3 = h_3 k,$$

где *k* – коэффициент засыпки, зависящий от засыпной плотности используемого порошка.

Затем устанавливаются расстояния Н<sub>4</sub> и H<sub>5</sub> между опорными поверхностями упоров 6 и 12 и, соответственно, подвижных упоров 4 и 11. При этом

$$H_4 = H_3 - h_3$$
 и  $H_5 = H_2 - h_2$ .

Далее устанавливаются размеры  $H_{10}$  и  $H_{11}$ , которые должны удовлетворять следующим условиям:

$$H_{10} = H_1 - h_3; H_{11} = H_1 - h_2.$$

Расстояния  $H_6 = H_1 - H_4$ ;  $H_7 = H_1 - H_5$ . Упоры 4, 11, 20 и 23 являются сменными и изготавливаются в зависимости от формы и размеров формуемой заготовки. Для рассматриваемого случая высоты  $H_8$  и  $H_9$  должны быть равны, соответственно,  $h_3$  и  $h_9$ .

Упоры 21 и 24 служат для возврата в крайнее верхнее положение пуансонов 29 и 30, образующих вместе с матрицей 27 рабочую камеру, в которую засыпается металлический порошок.

Во избежание поломки подвижных упоров и клиновой системы, наладку штампа следует проводить с засыпкой порошка в камеру, создавая силу на ползуне пресса не более 1 МН.

Штамповый блок работает следующим образом. Из питателя пресса порошок засыпается в рабочую камеру, питатель возвращается в исходное положение, а ползун вместе с плитой 17 и пуансоном 26 движется вниз и достигает зеркала матрицы 27, после чего начинается процесс формования порошковой заготовки. При последующем опускании пуансона в матрицу заполненный порошком рабочий объем засыпной камеры уменьшается и, как следствие, увеличиваются силы трения между частицами порошка и стенками матрицы, в результате чего матрица плывет вниз. В том же направлении перемещаются подвижные промежуточные плиты 18 и 22, которые своими упорами 6 и 12 входят в контакт с подвижными упорами 4 и 11. В этот момент развивается заданная сила (максимум 4 МН), и процесс формования заканчивается.

Далее, в соответствии с циклограммой работы пресса, настроенного для получения определенной заготовки, ползун с верхним пуансоном возвращается в исходное положение или остается на месте, после чего начинается стягивание матрицы с заготовки, т.е. матричная плита с матрицей продолжает двигаться вниз. В этот момент нижняя поверхность подвижной плиты 16 касается опорной поверхности клиновой системы 13, и дальнейшее перемещение последней выводит подвижные упоры 4 и 11 из-под упоров 6 и 12. Далее подвижные плиты 18 и 22 с закрепленными на них инструментами 29 и 30 перемещаются вниз и ложатся на неподвижные упоры, соответственно, 20 и 23. По окончании стягивания матрицы верхние торцы пуансонов 28, 29 и 30, оправка 31 и зеркало матрицы 27 образуют единую плоскость, на которой располагается готовая деталь. Удаляется она торцом питателя при его очередном движении для засыпки рабочей камеры.

Подчеркнем, что штамповые блоки, аналогичные приведенному на рис. 5.17, устанавливаются в пространство между рабочими столом и ползуном универсального пресса, приводимого от гидроцилиндра, который создает суммарную технологическую силу. Стол и ползун пресса на рис. 5.17 не обозначены отдельными позициями, но они показаны. К столу болтами 25 через призмы *I* прикреплена нижняя плита 2 штампового блока, а к ползуну прикреплена верхняя плита *17* штампового блока.

Поскольку пресс универсальный, он используется для производства номенклатуры изделий различных наименований. После изготовления партии изделий одного наименования штамповый блок на прессе заменяют на другой блок, предназначенный для производства партии изделий другого наименования.

Специалист, имевший дело с наладкой штамповочного оборудования, оценит, что сборка и наладка сменного штампового блока, конструкция которого приведена на рис. 5.17, а последовательность срабатываний элементов описана в комментарии к указанному рисунку, являются весьма трудоемкими процедурами.

Заметим, что приведенный на рис. 5.17 штамповый блок сконструирован на основе концепции о том, что во всех элементах изготавливаемой детали порошковая шихта должна быть уплотнена с одинаковыми изменениями между засыпной плотностью шихты и плотностью соответствующего элемента детали после уплотнения шихты. При этом достигнутые плотности во всех элементах изготовленной детали одинаковы. Сдвиги между частицами порошка при уплотнении шихты должны быть минимальными.

Как было отмечено выше, в п. 1.4, авторы данной монографии придерживаются противоположной концепции, считая, что при создании интенсивных сдвигов в уплотняемой шихте предотвращается появление расслоений, и открывается возможность формования высокоплотной порошковой детали на этапе, предшествующем ее спеканию.

Несмотря на различие концепций, формование порошковой детали из шихты при создании интенсивных сдвигов, так же, как и формование в приведенном на рис. 5.17 штамповом блоке, требует ряда последовательно выполняемых перемещений элементов штампа в процессе одной формующей заготовку операции. На рис. 5.18 показан лабораторный штамп, предназначенный для изготовления детали сложной формы формованием со сдвигами слоев порошка. Формование в штампе на рис. 5.18 имеет аналогию с рассмотренным выше формованием детали, показанной на рис. 4.45.

Штамп состоит из бандажированной матрицы, содержащей бандаж 4 и вставку 3 (см. рис. 5.18), внутреннего пуансона 1, наружного пуансона 2, втулки 5, иглы 6. Матрица крепится к ползуну пресса, как показано выше, на рис. 4.2. Предлагаемая конструкция инструмента благоприятна для засыпки порошка через верхнее очко матрицы, поскольку порошок засыпается в расширяющуюся полость. После засыпки порошка верхнее отверстие полости матрицы закрывается втулкой 6, и начинается уплотнение порошка, процесс которого можно разделить на приведенные ниже 3 этапа. На 1 этапе производится предварительное уплотнение верхней части конуса детали и оформление ее верхней торцевой поверхности путем продвижения втулки 5 в верхнее отверстие матрицы. На 2 этапе двухсторонним воздействием давления формуется цилиндрическая часть детали. При этом внутренний пуансон 1 перемещается относительно наружного пуансона 2. На 3 этапе порошок уплотняется двухсторонним давлением при одновременном радиальном выдавливании благодаря совместному перемещению пуансонов 1 и 2 относительно конической части матрицы.



**Рис. 5.18.** Схема и перемещение элементов лабораторного штампа для формования детали со сдвигами слоев порошка

При формовании детали необходимо достичь максимально высокую плотность в средней ее части, а также обеспечить высокую плотность в ее цилиндрической части.

Для решения этих задач было подобрано начальное (перед засыпкой порошка) взаимное расположение матрицы и наружного пуансона: *H*, а также – наружного и внутреннего пуансонов: *h*.

Высота *h* пуансона 2 относительно внутреннего пуансона *l* устанавливалась с помощью подкладных колец и мерных плит. Аналогично устанавливался размер *H*.

Формование проводилось из порошковой шихты на основе порошка марки ПЖРВ3.200.28, легированного 0,65% углерода. При подготовке по-

рошковой шихты в нее в качестве смазки добавили 1% (по массе) стеарата цинка. В качестве технологического оборудования использовали универсальный пресс ПБ-476, имевший номинальную силу 1,6 МН.

Объем засыпки порошка соответствовал теоретическому объему, рассчитанному по чертежу детали. При чрезмерном увеличении размера *h* наблюдалось недостаточное уплотнение цилиндрической части и, как следствие, разрушение детали в месте перехода от конической части к цилиндрической при извлечении ее из штампа. При малой высоте *h* также имело место недостаточное уплотнение цилиндрической части, которое вело к разрушению детали.

Процесс уплотнения порошка обладает элементами саморегулирования. Формование цилиндрической и конической частей детали происходит одновременно. Средняя плотность изготовленных деталей составляет 86 ... 88% (рис. 5.19).



Рис. 5.19. Порошковые втулки со ступенчатой фланцевой частью из ПЖРВЗ.160.24

Процесс формования деталей обладает высокой стабильностью. После выбора наилучших размеров *h* и *H* вероятность изготовления деталей с требуемыми параметрами составила в опытной партии практически 100%.

Для осуществления извлечения формованной детали на наружном пуансоне 2 сделана резьба для навинчивания фланца, являющегося опорой на подкладную глубокую втулку, при извлечении детали с помощью толкателей, проходящих через отверстия во фланце.

Перемещения инструмента при формовании с созданием сдвигов слоев уплотняемой порошковой шихты в конструкции штампа промышленного типа показаны на рис. 5.20 [1].

Штамп состоит из нижней 4 и верхней 1 плит, связанных направляющими колонками 3. На верхней плите штампа закреплена матрица 2, на нижней плите – полый пуансон 5. Внутри полого пуансона находится ступенчатая оправка 6. Оправка перемещается выталкивателем гидропресса.

На рис. 5.20, *а* элементы штампа находятся в положении, при котором порошок засыпают в матрицу. Засыпку осуществляют через участок полости матрицы с меньшим диаметром.
По окончании засыпки оправка выталкивателем пресса перемещается вверх, как показано на рис. 5.20, б. При этом оправка своим уступом и за счет контактного трения продвигает прилегающие к ней слои порошка в тонкостенную часть будущей втулки, обеспечивая равномерное заполнение полости матрицы. Одновременно оправка перекрывает засыпное отверстие, замыкая пространство полости матрицы. Этап формования детали показан на рис. 5.20, *г*. Он осуществляется перемещением матрицы 2 навстречу пуансону 5. При этом объем полости матрицы уменьшается, и порошок в ней равномерно уплотняется.



Рис. 5.20. Штамп для формования заготовок тонкостенных втулок:
 *a* – в положении засыпки порошка; *б* – после рабочего перемещения оправки;
 *в* – в раскрытом положении; *с* – в конце формования

### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

На рис. 5.20, в штамп показан в раскрытом состоянии. Расстояние между пуансоном и поднятой матрицей превышает высоту формованной заготовки, оправка отведена ниже пуансона. Изготовленные в этом штампе детали показаны на рис. 5.21.



Рис. 5.21. Детали, формованные в штампе приведенной на рис. 5.20 конструкции

## 5.3. Нанесение инновационных покрытий на пуансоны для закрытой прошивки

Выше, в п. 1.3, было рассмотрено, что смазочный материал на заготовку из стали наносят с предварительным образованием на поверхности заготовки слоя носителя смазочного материала. В качестве такого слоя используют фосфатное покрытие. Однако фосфатирование в настоящее время считают операцией, не отвечающей современным экологическим требованиям.

Инновационным направлением, позволяющим избежать фосфатирования заготовки, является нанесение на инструмент высокопрочного самосмазывающего покрытия. С участием авторов данной монографии разработана технология изготовления такого покрытия на основе переработки титановой стружки.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана исследователи с кафедры полупроводникового и электровакуумного машиностроения предложили в структуру слоев износостойких покрытий добавить слои дисульфида молибдена (MoS<sub>2</sub>) для того, чтобы покрытия были не только износостойкими, но и антифрикционными, так называемыми, самосмазывающими [50].

Такие покрытия наносятся с использованием магнетронов.

В магнетронах из распыляемых мишеней, состоящих из материалов, составляющих покрытие, выбивают наночастицы, которые осаждаются на подготовленную требуемым образом поверхность инструмента и создают наноструктурированное покрытие этого инструмента.

Была рассмотрена возможность применения в технологическом процессе нанесения покрытий нескольких магнетронов, каждый из которых осуществлял нанесение одного из слоев. В качестве альтернативы была рассмотрена возможность составления композиционной распыляемой мишени путем смешивания порошковых материалов и изготовления из этой композиции распыляемой мишени для одного магнетрона.

Показано, что для нанесения износостойких самосмазывающих покрытий, содержащих в своем составе твердые компоненты и мягкую составляющую – смазывающий материал, целесообразно использование одного источника распыления и в нем распыляемой мишени, включающей в необходимом соотношении все компоненты, входящие в состав будущего нанокомпозиционного покрытия: Ti + MoS<sub>2</sub>, Ti + Al + MoS<sub>2</sub> и т.п.

При изготовлении порошковых распыляемых мишеней их титановая составляющая может быть получена путем измельчения отходов, имеющих место при производстве деталей из титана резанием, например, в авиационном или космическом машиностроении. Такими отходами является титановая стружка.

Раньше проведения описанного ниже исследования все отходы титановых сплавов, образующиеся при производстве слитков, полуфабрикатов и деталей, а также бракованные или приведенные в негодность изделия из титановых сплавов (лом) классифицировали по группам и сортам [51]. Однако такая классификация не дает возможности определить режимы измельчения отходов до необходимых размеров их фрагментов. Для решения этой задачи стружечные отходы было необходимо подготовить к исследованиям.

Для этого изначально весь материал был очищен от находившегося на его поверхности масла и остатков смазывающе-охлаждающей жидкости, применяемой при операциях обработки резанием. Стружка была промыта в горячем (70 ... 80 °C) растворе технической соды в воде путем интенсивного перемешивания в течение 10 ... 20 мин, 3–4 раза с промежуточной заменой раствора на чистый. После этого стружка была промыта в проточной горячей воде в течение 30 мин. Влажную стружку помещали в сушильный шкаф с температурой 100 ... 150 °C с приточной вентиляцией, для просушки.

Очищенная стружка была сортирована с целью выявления особенностей ее структуры и размеров элементов. Сортированная стружка показана 5.22.

Как видно из рисунка, вся стружка была разделена на 4 типа, которые авторами данной монографии характеризовались следующим образом:

1 тип – это стружка с большим углом закрутки и плотно прилегающими друг к другу кольцами, иначе говоря, с маленьким шагом между кольцами, длина каждого фрагмента, составляющего этот тип, равна примерно 200 ... 500 мм;

2 тип – это фрагменты стружки с меньшими, чем у 1 типа, углами закрутки, имеющими меньшую длину, которая укладывалась для этого типа в диапазон 20 < *l* < 200 мм;

3 тип – это стружка без закрутки, длина фрагментов у которой составляла 20 < *l* < 200 мм;

4 тип – это стружка, не относящаяся ни к одному из охарактеризованных выше типов.



Рис. 5.22. Виды стружки после ее разделения на 4 типа

Для того, чтобы получаемый из стружки полуфабрикат имел стабильность по механическим характеристикам, необходимо предусмотреть в технологии его изготовления использование определенного размера частиц перемолотой стружки. Поэтому экспериментально исследованы и установлены технологические параметры перемола, а также размеры фракций, получаемые при различных режимах перемола.

Экспериментальное устройство для грубого перемола стружки состояло из цилиндрического стакана с внутренним диаметром 140 мм и глубиной 170 мм, внутрь которого был помещен сплошной цилиндр (ударник) с диаметром 72 мм и длиной 1240 мм, изготовленный из стали ШХ15. Этот внутренний цилиндр при вращении внешнего стакана с небольшой скоростью не только перетирал стружку ввиду своей большой массы, но также производил удары. Удары происходили потому, что цилиндр вследствие трения по стенке полости вращаемого стакана поднимался в свое верхнее в полости положение, а потом, потеряв контакт со стенкой стакана, под собственным весом падал в нижнее положение.

При загрузке устройства стружка засыпалась в полость между внутренней поверхностью стакана и внешней поверхностью вложенного в стакан ударника. Стакан закрывался крышкой, закрепляемой болтами. Собранная конструкция закреплялась в трехкулачковом патроне токарного станка. Стакану со стружкой придавалось вращательное движение, при этом варьировали продолжительность обработки т и скорость вращения *n*.

Перемол стружки 1 типа проводился с использованием ударника ( $\tau = 40$  мин, n = 90 об/мин), после чего в этом же стакане проводился дополнительный перемол этой же стружки с использованием засыпанных в полость корпуса гаек, мелких шестерен и шариков от подшипников ( $\tau = 60$  мин, n = 120 об/мин).

Перемол стружки 2 типа проводился с использованием ударника ( $\tau = 40$  мин, n = 90 об/мин), после чего он продолжался с использованием засыпанных в стакан гаек, мелких шестерен и шариков от подшипников ( $\tau = 90$  мин, n = 112 об/мин).

Перемол стружки 3 типа проводился с использованием ударника ( $\tau = 30$  мин n = 112 об/мин), а затем, дополнительно, с использованием гаек, мелких шестерен и шариков от подшипников, при этом увеличение времени дополнительного перемола по сравнению со временем для стружки 2 типа значительных результатов не принесло.

Перемол стружки 4 типа проводился с использованием только ударника ( $\tau = 40$  мин; n = 120 об/мин).

После грубого перемола стружка подверглась дальнейшему измельчению в устройстве, переделанному из кофемолки. Крышку кофемолки изготовили из стали 45, кроме этого модернизации подверглись и перемалывающие ножи. Ножи с целью повышения срока их службы (замедления истирания поверхности) были изготовлены из полотна ножовки.

Мелкий перемол всех четырех типов стружки в описанном устройстве проводился в течение 3 минут при скорости вращения ножа, равной 3000 об/мин.

На этапах грубого и тонкого перемола каждого из четырех типов стружки были определены гранулометрические составы порошков. Также было установлено, что при тонком измельчении, как и при грубом, происходит образование намола от инструмента, т.е. образуется дополнительная нежелательная порция порошка, не предусмотренная по рецептуре. Для отделения этой порции использовали различие в магнитных свойствах титана и железа.

Магнитная сепарация производилась следующим образом. Магнит, обернутый в полиэтиленовую пленку, при размещении над поверхностью перемолотой порции порошка притягивал к себе только намол от железных составляющих инструмента. Этот намол удаляли.

Исследование гранулометрического состава порошков после мелкого перемола в описанном устройстве не показало сильного различия между порошками, полученными из стружек, отнесенных первоначально к четырем типам, поэтому, отказавшись от ранее использовавшегося метода разделения на фракции на этапе грубого перемола, мелкая фракция была получена из смеси всех четырех фракций (смесь 5). Гранулометрический состав этой смеси был определен с помощью разработанной методики по анализу цифрового изображения пробы. Методика состояла из следующих последовательно выполняемых шагов.

Производили снимки цифровой камерой Canon Power Shot S50. Редактировали снимки в программном комплексе Photo Shop CS. Анализировали черно-белое изображение в программе Scion. Проводили анализ и обработку полученных данных в Excel 2003 по стандартным методам подсчета гранулометрических составов.

Данные по гранулометрическому составу после мелкого помола представлены на графике, рис. 5.23. Размер частиц перемолотой стружки в среднем составил 14,6 мкм.

Для выяснения степени ее окисления, титановая стружка после ее мелкого перемола была подвергнута спектральному анализу. Анализ был проведен в Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТе им. А.А. Байкова). Отмечено, что химический состав стружки содержит высокий процент оксидов Ti, а также его соединений с С и N.



**Рис. 5.23.** Гранулометрический состав смеси всех 4 типов стружки после мелкого помола (смесь 5)

Перемолотая стружка была использована как основа последующей порошковой смеси (шихты), из которой изготавливали мишени для магнетронов. Вторым компонентом шихты был порошок MoS<sub>2</sub>. Перемешивание компонентов в соотношении 50 : 50% осуществлялось в описанном выше устройстве для грубого помола, но уже без внутреннего цилиндра-ударника. Вместо него для интенсификации процесса перемешивания добавляли крупные шарики диаметром 15 мм, извлеченные из колец подшипников. Качество перемешивания оценивалось по однородности окраски перемешанной порции шихты.

По техническим характеристикам имевшегося магнетрона формовали мишень с размерами: диаметр 78 мм, толщина 4 мм. Мишень формовали на гидравлическом прессе силой 5МН при одностороннем движении формующего пуансона. Давление в штампе составляло примерно 1050 МПа.

Фотография изготовленной распыляемой мишени и ее вид после работы в магнетроне приведены, соответственно, на рис. 5.24 и рис. 5.25.

Для повышения срока службы показанной на рис. 5.24 распыляемой мишени для магнетрона целесообразно существенно повысить ее плотность. Такую задачу можно решить только в рамках концепции о необходимости создания существенных сдвигов в уплотняемом порошке [31].





**Рис. 5.24.** Мишень для магнетрона из композиционного материала Ti +MoS<sub>2</sub>

Рис. 5.25. Вид мишени в магнетроне после ее распыления в течение 20 часов

При применении схем уплотнения порошковой шихты, предусматривающих большие сдвиги между частицами, плотность формуемых распыляемых мишеней повышается в среднем на 10 ... 12% и при этом существенно увеличивается срок их службы.

Указанным выше образом авторы данной монографии не только разработали процесс создания наноструктурированных износостойких самосмазывающих покрытий на пуансонах для ХОШ, но и сделали этот процесс экономически выгодным.

Диоксид титана является одним из важнейших промышленных неорганических материалов, по уровню применения которого можно судить о научно-техническом потенциале государства. Спрос на диоксид титана в мире обусловлен ростом различных отраслей промышленности, в том числе, машиностроения.

По-видимому, при современном дефиците экологически чистых материалов, которые можно применить для смазывания инструмента и заготовок при ХОШ, использование покрытий из диоксида титана, наносимых на инструменты и заготовки изложенным ниже способом, может быть реальной альтернативой покрытий, содержащих MoS<sub>2</sub> и WS<sub>2</sub>.

Изготовление мишеней показанного на рис. 5.24 типа из порошков на основе диоксида титана возможно осуществлять по двум технологиям. Первая: холодное формование порошка в закрытой матрице – спекание – горячая штамповка пористой заготовки в закрытой матрице. Вторая: горячее формование непосредственно мишени из порошка в закрытой матрице.

Недостатком первой из названых выше технологий является трудность обеспечения равномерного распределения плотности в объеме мишени. При отсутствии равномерного распределения плотности происходит неравномерная усадка при спекании. В результате наблюдается коробление мишеней и образование в них трещин. Помимо этого, необходимо применение дополнительного технологического оборудования для спекания и последующей горячей штамповки сформованной и спеченной пористой заготовки. С учетом этих недостатков первой из указанных выше технологий, предпочтение отдано второй. При этом необходимо обеспечивать нагрев порошка до заданной температуры непосредственно в матрице.

Схема установки для реализации второй технологии приведена на рис. 5.26. Между плитами пресса размещена печь с силитовыми нагревателями. Конструкция печи допускает ее быструю разборку для установки и извлечения матрицы с заготовкой. Печь имеет отверстия, в которые входят формующие порошок пуансоны, а также отверстие для установки термопары. Температура в печи регулируется путем изменения напряжения на силитовых нагревателях.

Поскольку нагрев керамических порошков производится непосредственно в матрице, установленной внутри нагревательной установки, их уплотнение можно считать изотермическим. Температурный интервал горячего формования пластин установлен в интервале 1200 ... 1300 °C. Необходимость поддержания высокой температуры обусловливает специфические требования по жаропрочности к материалам, из которых изготавливается инструментальная оснастка.

Для изготовления рабочих деталей оснастки применен карбид кремния, обладающий высокой прочностью на сжатие, износостойкостью, жаростойкостью, сохраняющий высокие механические характеристики при повышенных температурах. Карбид кремния имеет высокую термостойкость и теплопроводность, температура его плавления 2600 °C. Рабочие детали штампа из карбида кремния выдерживают 40 и более циклов нагружения при температуре 1300 °C. Предотвращение приваривания порошковой заготовки к инструменту обеспечено созданием разделительного слоя из диоксида циркония. Толщина разделительного слоя примерно 1 мм.



Рис. 5.26. Схема установки для нагрева порошка и формования пластины: 1 – испытательная машина Инстрон-350; 2 – печь; 3 – верхний пуансон; 4 – изделие; 5 – матрица; 6 – нижний пуансон; 7 – гидропривод машины; 8 – индикатор перемещений инструмента

Горячее формование мишени из порошка TiO<sub>2</sub> включает в себя две стадии. На первой стадии происходит кратковременное деформирование, а на второй – пластическая деформация происходит во времени. Вторую стадию Н.Н. Малинин назвал кратковременной ползучестью. Продолжительность второй стадии при формовании мишеней измеряется десятками минут.

В проведенном исследовании с помощью следящей системы испытательной машины Инстрон-350 обеспечено горячее изостатическое формование порошка TiO<sub>2</sub>. Оно было направлено на определение зависимости плотности изделия от температуры, при которой производится формование, давления сжатия порошка, времени выдержки под давлением, дисперсности порошка.

Дисперсность порошка (размер зерен) была рассмотрена в качестве варьируемого параметра, поскольку имеются работы [52] по горячей штамповке титана, указывающие на существенное влияние этого размера.

Формование производилось при температуре, соответствующей наибольшей пластичности материала. Верхняя граница интервала наибольшей пластичности для исследуемого материала равна 1300 °C. В проведенном исследовании поиск нижней границы температурного интервала горячего формования начат с 1100 °C.

Штамповая оснастка из карбида кремния выдерживает удельные силы (усредненные давления) до 40 МПа. Выбранный при исследовании диапазон изменения давления составлял 20 ... 40 МПа. За верхнюю границу диапазона выдержек под давлением было принято 50 мин. Нижняя граница исследованного диапазона – 10 мин. В исследовании применены порошки с размером зерен 2,2; 2,7; 3,5; 4,3; 4,54 мкм.

Исследование направлено на отыскание параметров процесса, при которых достигается наиболее высокая плотность мишени. Плотность оценивается по значению водопоглощения. Для этого предварительно взвешенное с точностью до 0,0001 г изделие подвергали длительному кипячению. После кипячения изделие вновь взвешивали, и по разности весов подсчитывали водопоглощение.

Авторы данной монографии ниже использовали методику планирования эксперимента и обработки его результатов, предложенную М.М. Протодья-коновым и Р.И. Тедером [26] (см. рис. 5.27, табл. 49 и 50).

_						
$\wedge$	a	1100	1150	1200	1250	1300
8	$\mathcal{X}$	10 20 50	20 30 40 50	10 20 50 50	20 30 40 50	10 30 50 50
20	2.2 2.7 3.5 4.3 4.54	15,0	11,5	10,9	<b>3</b> ,2	0,34
25	2.2 2.7 3.5 4.3 4.54	14,7	9,3	9,96	5,75	■ <sub>0,13</sub>
50	2.2 2.7 3.5 4.3 4.54	10,8 🗖	10,5	8,2	5,8	0,18
35	22 27 35 43 454	11,5 🔳	10,5	6,4	<b>1</b> ,36	0,27
40	22 27 3.5 43 454	9,5	<b>7</b> ,4	7 <u>,</u> 97	<b>4</b> ,9	0,17

**Рис. 5.27.** Комбинационный квадрат, показывающий значения 4 рассматриваемых параметров в каждом из 25 проведенных опытов

В больших клетках приведенного на рис. 5.27 комбинационного квадрата отмечены измеренные по описанной выше методике величины водопоглощения (%) образцов, сформованных при сочетании параметров, соответствующих малым клеткам: где a – температура, °C; b – удельная сила (усредненное по поверхности образца давление), МПа; c – время выдержки под давлением, мин; d – размер зерна, мкм.

Табл. 49	. Результаты	в зависимости	от температуры и	и давления
----------	--------------	---------------	------------------	------------

Давление, МПа	Водопоглощение, р %						
	t=1100 °C	t =1150 °C	t=1200 °C	t=1250 °C	t=1300 °C	Сумма по строке	Среднее по строке
20 25 30 35 40	15,0 14,7 10,8 11,5 9,5	11,5 9,3 10,5 10,5 7,4	10,9 9,96 8,2 6,4 7,97	3,2 5,75 5,6 1,36 4,9	0,34 0,13 0,18 0,2 0,17	40,94 39,84 35,28 29,96 29,94	8,188 7,968 7,056 5,992 5,988

Окончание таблицы 49

Пологии	Водопоглощение, р %							
Давление, МПа	t=1100 °C	t=1150 °C	t=1200 °C	t=1250 °C	t=1300 °C	Сумма по строке	Среднее по строке	
Сумма по столбцу	61,5	49,2	43,43	20,81	1,02	175,96	_	
Среднее по столбцу	12,3	9,84	8,686	4,162	0,5044	_	35,392	

Табл. 50, Результаты в зависимости от времени выдержки под давлением и размера зерна

Размер	Водопоглощение, р %							
зерна, мкм	τ =20 мин	τ=20 мин	τ = 30 мин	τ = 40 мин	τ = 50 мин	Сумма по строке	Среднее по строке	
2,2 2,7 3,5 4,3 4,54	0,18 9,96 4,9 10,5 15,0	9,5 1,36 0,13 10,9 10,5	3,2 7,4 8,2 14,7 0,2	9,3 0,34 11,5 5,6 7,97	6,4 10,8 11,5 0,17 5,75	28,58 29,86 36,23 41,87 39,42	5,716 5,972 7,246 8,374 7,884	
Сумма по столбцу	40,54	32,39	33,7	34,71	34,62	175,96	_	
Среднее по столбцу	8,108	6,478	6,74	6,942	6,924	_	35,392	

Из табл. 49 и 50 видны результаты опытов, способ обработки результатов и зависимость водопоглощения (р) изделия от каждого из четырех параметров процесса при усредненном влиянии трех других. По результатам обработки экспериментальных данных построены представленные на рис. 5.25 зависимости.



**Рис. 5.28.** Зависимости водопоглощения  $\rho$  (%) образцов мишеней от температуры формования (*a*), давления ( $\delta$ ), времени выдержки под давлением ( $\delta$ ) и размера зерен (*г*)

Из графиков на рис. 5.28 следует, что наибольшее влияние на водопоглощение мишени, т.е. на ее плотность, оказывает температура горячего формования. При приближении к 1300 °C повышение температуры на несколько градусов существенно увеличивает плотность изделия. В тоже время, изменение давления сжатия порошка от 35 до 40 МПа практически не влияет на плотность изделия. Следовательно, в процессе горячего формования давление можно поддерживать менее тщательно, чем температуру. Увеличение при формовании времени выдержки под давлением свыше 20 мин практически не влияет на плотность изделий. Средний размер зерна формуемого порошка оказывает значительное влияние на плотность изделия. Судя по полученной зависимости, это влияние убывает, когда зерно становится мельче 2,5 мкм.

При сочетании четырех исследованных параметров (температура 1300 °С, давление 40 МПа, время 20 мин и размер зерна 2,2 мкм), позволяющем изготовить мишень с наибольшей плотностью, оценена зависимость плотности от формы и размеров изделия в плане. Дополнительный эксперимент показал, что форма и размеры в плане практически не влияют на плотность изделия.

# 5.4. Прессы для штамповки с активно направленными напряжениями контактного трения на поверхности заготовок

Описываемые ниже прессы являются специализированными. Они создаются для массового или крупносерийного производства одного изделия или нескольких однотипных изделий в течение всего срока своей службы. В конструкции специализированных прессов можно отказаться от ряда элементов, присутствующих у универсальных прессов, в частности, рабочего стола и ползуна. Вместо них в конструкцию специализированных прессов можно добавить элементы, позволяющие реализовать наиболее рациональное нагружение штампуемой заготовки [1, 3, 5, 53]. Рациональность нагружения определяется повышением качества изделий, сокращением энергозатрат, и увеличением производительности труда.

Кроме этого, специализированные прессы должны обладать конструкцией, изготовление и сборку которой смогут осуществить для собственных нужд машиностроительные предприятия, специализирующиеся не на производстве прессов, а на выпуске иной машиностроительной продукции. В частности, предприятия, производящие корпусные цилиндрические детали, для которых инновационная технология, связанная с использованием активно направленных напряжений контактного трения, позволяет расширить область применения перспективного процесса холодной закрытой прошивки заготовок. Конструкция специализированного пресса для ХОШ с активно направленными напряжениями контактного трения приведена на рис. 5.29.

В прессе, если матрицу, установленную в траверсе 2, с помощью гидроцилиндров 3 перемещать в направлении течения материала со скоростью, превышающей скорость течения, напряжения контактного трения на границе заготовки с матрицей будут способствовать течению и разгрузят пуансоны. Функцию ползуна пресса выполняет плунжер 1 главного гидроцилиндра, непосредственно на котором без штамповой плиты размещен штампующий заготовку пуансон. Фотография этого пресса приведена на рис. 5.30.

При эксплуатации описанного выше пресса выявлено, что траверса 2 имеет недостаточную собственную жесткость, а также высоту посадочной поверхности в гильзе-станине пресса. В результате при закрытой прошивке заготовки вследствие несинхронной работы гидроцилиндров 3 возможен перекос траверсы, что приводит к несоосности внутренней и наружной поверхностей изделия.

Следовательно, целесообразно конструировать пресс в соответствии со схемой, приведенной на рис. 5.31. В этой конструкции главный гидроцилиндр 8 выполнен вне гильзы 3 и размещен под столом пресса. На его плунжере 7 установлен пуансон 5. Второй пуансон 6 установлен на опоре 2. Матрица 4 скреплена с гильзой 3, которая перемещается по опоре 2 под действием боковых гидроцилиндров 1. Для лучшего перемещения гильзы 3 по опоре 2 эту опору целесообразно изготавливать из бронзы.



Рис. 5.29. Конструкция пресса для закрытой прошивки заготовок с активно направленными напряжениями контактного трения



**Рис. 5.30.** Пресс, схема которого приведена на рис. 5.29



Рис. 5.31. Схема пресса с повышенной жесткостью траверсы для перемещения матрицы



Рис. 5.32. Схема гидропресса с размещением гидроцилиндров на центральной оси

Для изготовления специализированного пресса приведенной на рис. 5.31 конструкции для закрытой прошивки заготовки с активно направленными напряжениями контактного трения по ее поверхности требуется применение координатно-расточных станков.

Более технологична в изготовлении конструкция пресса, приведенная на рис. 5.32.

В этой конструкции все гидроцилиндры размещены на одной общей оси. При ее изготовлении требуются в основном токарные, круглошлифовальные и простые фрезерные работы.

В прессе на рис. 5.32 главный гидроцилиндр *I* расположен под столом пресса. Плунжер главного гидроцилиндра *2* является ползуном пресса и штамповой плитой. На нем установлен пуансон *3*. Второй пуансон *6* закреплен на опоре *7*, которая служит штоком гидроцилиндра привода матрицы *5*. К гильзе этого гидроцилиндра крепят траверсу пресса *4*, служащую для перемещения матрицы.

В прессе предусмотрено надежное направление опоры 7 по втулке 8, что позволяет свести к минимуму несоосность верхнего пуансона 6 и матрицы 5.

Рабочая жидкость в полости главного гидроцилиндра *1* подается от насоса *13* через трехпозиционный четырехходовой золотник *12*. Рабочая жидкость в полости гидроцилиндра привода матрицы подается от насоса *11* через трехпозиционный четырехходовой золотник *10*. Соотношение скоростей перемещения пуансона *3* и матрицы *5* регулируется с помощью дросселя *9*. Сборочный чертеж пресса, схема которого показана на рис. 5.32, приведен на рис. 5.33.

Техническая характеристика пресса, чертеж которого приведен на рис. 5.33, следующая.

Номинальная сила, МН	1,6
Номинальное давление рабочей жидкости, МПа	32
Наибольшая высота штампуемой детали, мм	160
Наибольший диаметр штампуемой детали, мм	40
Скорость перемещения пуансона, мм/с	2,7
Скорость перемещения матрицы, мм/с:	
вверх	. 12,7
ВНИЗ	6,8
Габариты, мм	2000
Масса без привода, кг	1200
Установочная мощность, кВт	8,5



В прессе на рис. 5.33 главный гидроцилиндр I имеет поршневую полость A для создания номинальной деформирующей заготовку силы и полость E для создания силы, возвращающей шток с установленным на нем пуансоном 4 в исходное для рабочего хода положение. Главный гидроцилиндр I установлен под столом пресса 2.

Матрица 3 установлена в траверсе 5, приводимой в движение гидроцилиндром 7. При подаче рабочей жидкости в полость В гидроцилиндра матрица опускается, как показано на рис. 5.33, слева от оси чертежа. При подаче рабочей жидкости в полость Г гидроцилиндра матрица движется вверх, как показано на рис. 5.33, справа от оси чертежа.



### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Верхний пуансон 6 установлен на штоке 8 гидроцилиндра привода матрицы. Шток этого гидроцилиндра неподвижно закреплен на верхней поперечине пресса, которая скреплена со столом пресса 4 колоннами. Как было показано при комментарии к схеме на рис. 5.32, направление гильзы 5 верхнего гидроцилиндра пресса по штоку 8 этого гидроцилиндра осуществляется с помощью бронзовой втулки, имеющей посадку без зазора по боковой поверхности штока. Это позволяет свести к минимуму несоосность верхнего пуансона 6 и матрицы 5.



**Рис. 5.34.** Пресс на производственном участке

Пресс описанной конструкции технологичен в его сборке и монтаже, прост в наладке. Фотография этого пресса, установленного на производственном участке, приведена на рис. 5.34.

Пресс аналогичной приведенной на рис. 5.33 и 5.34 конструкции, имеющий номинальную силу 6,3 МН, был изготовлен ОАО «Тяжрессмаш» (г. Рязань) по чертежам, выполненным под руководством авторов данной монографии. Прессу присвоена марка заводской модели РПГ-37.

Узел крепления сменного инструмента в прессе РПГ-37 приведен на рис. 5.35. Крепление пуансона в этом узле с указанием позиций и разъяснением назначения входящих в него деталей было показано выше, на рис. 5.4. Рабочий чертеж верхнего пуансона пресса силой 6,3 МПа приведен на рис. 5.5. Рабочие

чертежи деталей, с помощью которых осуществлено крепление показанного на рис. 5.5 пуансона, представлены на рис. 5.6-5.9.

Узел опоры нижнего пуансона на шток нижнего гидроцилиндра пресса РПГ-37 (см. схему, приведенную на рис. 5.33) показан на рис. 5.36. На этом рисунке видно, что в полости штока установлена обойма 5, ниже которой размещена прокладка 3, на которую оперты сферический подпятник 7 и сферическая пята 6. На верхний торец пяты 6 опирается нижний пуансон пресса. Верхним торцом этот пуансон по посадке без гарантированного зазора входит в нижнюю полость матрицы, показанной тонкими линиями на рис. 5.35, навстречу показанному на этом рисунке также верхнему пуансону.

В узле опоры нижнего пуансона (см. рис. 5.36) применены детали, аналогичные деталям, входящим в узел крепления верхнего пуансона, чертежи которых представлены выше на рис. 5.6, 5.8 и 5.9.



Рис. 5.35. Узел крепления сменного инструмента в прессе РПГ-37 производства ОАО «Тяжрессмаш» (г. Рязань)



Рис. 5.36. Узел опоры нижнего пуансона в прессе РПГ-37

В приведенных на указанных чертежах таблицах размеров для деталей с позициями 3, 5 и 1 на рис. 5.36 (для узла опоры нижнего пуансона) следует принимать нижние строки таблиц, приведенных на рис. 5.6, 5.8 и 5.9.

Рабочие чертежи сферических пяты (поз. *6*) и подпятника (поз. *7*) и втулки упорной (поз. *4*), показанных на рис. 5.36, приведены, соответственно, на рис. 5.37, 5.38 и 5.39.







1. НКС 52 ... 54. 2.\*Поверхность притереть по дет. 3. Неуказанные предельн. откл. размеров: отв.-по H 14; валов - по h-14, остальных ± <u>3714</u> 4.\*\* Размер для справок.





Рис. 5.39. Чертеж втулки упорной

Схема пресса с размещением гидроцилиндров привода инструментов на одной оси, но с большим, чем у пресса, схема которого показана на рис. 5.32, сокращением металлоемкости приведена на рис. 5.40. Масса этого пресса, имеющего силу 1 МН, составляет всего 350 кг.



Рис. 5.40. Конструкция особо малогабаритного пресса для ХОШ с активными силами трения

Пресс содержит станину *1* с установленным на ней главным гидроцилиндром *2*, имеющим шток *3*, являющийся одновременно штоком вспомогательного гидроцилиндра с гильзой *4*, жестко соединенной с контейнером *5*, и поршнем *6* с установленным на нем пуансоном *7*.

Пресс работает следующим образом. Заготовку 8 помещают в штамповое пространство, после чего подачей жидкости в рабочие полости A и B гидроцилиндра 2 при соединении со сливом полости E гильзы 4 осуществляют ход сближения, при котором заготовка проталкивается в матрицу. Продолжая подачу жидкости в указанные полости, осуществляют рабочий ход закрытой прошивки с активным действием напряжений трения на поверхности контакта заготовки с матрицей. Для извлечения изделия из штампа подачей жидкости в полость E гильзы 4 при соединении со сливом полости A гидроцилиндра 2 непосредственно и полости B через подпорный клапан возвращают штамповый инструмент в исходное положение.

Конструкция наиболее компактного и многофункционального из прессов для рассмотренных технологий схематично изображена на рис. 5.41.



**Рис. 5.41.** Компактный многофункциональный гидропресс

Этот пресс, кроме холодной закрытой прошивки с активными силами трения, предназначен для формования высокоплотных стаканов из железного порошка. В прессе главный гидроцилиндр l является одновременно станиной. Главный гидроцилиндр содержит два поршня: 2 и 9. Шток 3 поршня 2 является гильзой вспомогательного гидроцилиндра с поршнем 4 и штоком 5, на котором установлен пуансон 7, второй пуансон 6 установлен на штоке 3.

Поршень 9 неподвижно соединен с матрицедержателем 8, в котором находится матрица 10. Третий пуансон 11 (контрпуансон) установлен на станине 1.

Пресс работает следующим образом. В матрицу 10 засыпают металлический порошок, смешанный с пластификатором. Подачей жидкости в рабочие полости гидроцилиндров инструменты отводят в положение, при котором торец пуансона *6* находится выше торца пуансона *7* и является оправкой, формующей полость в заготовке. Матрица находится в нижнем положении (рис. 5.41, справа).

При рабочем ходе в начале подается жидкость в полость  $\mathcal{L}$ , при этом полость  $\mathcal{A}$  соединяется со сливом, а входы в полости A и B закрыты. Матрица 10 поднимается, и пуансон 11 закрывает ее горловину. Затем подают рабочую жидкость в полость B, при этом полость  $\mathcal{L}$  соединяют со сливом. Входы в полости A и  $\mathcal{A}$  закрыты. Пуансон 7 поднимается и уплотняет стенку формуемого стакана. После окончания уплотнения стенки подают рабочую жидкость в полость  $\mathcal{A}$ , при этом полость  $\mathcal{L}$  соединяют со сливом, а входы в полости A и B закрыты. При этом полость  $\mathcal{L}$  соединяют со сливом, а входы в полости A и B закрыты. При этом полость  $\mathcal{L}$  соединяют со сливом, а входы в полости A и B закрыты. При этом матрица перемещается вниз и активно направленными напряжениями контактного трения дополнительно уплотняет стенку формуемого стакана. Затем подают рабочую жидкость в полость A при соединенной со сливом полости  $\mathcal{L}$  и закрытых входах в полости B и  $\mathcal{L}$ . При этом пуансоны 6 и 7 калибруют дно стакана.

После окончания формования последовательной подачей жидкости в одну из полостей каждого гидроцилиндра при соединении другой со сливом и одновременном перекрытии входов в оставшиеся две полости производят раскрытие штампа и извлечение изделия.

Преимуществом прессов, показанных на рис. 5.40 и 5.41, является их работа от одного насоса. В конструкциях, показанных на рис. 5.29–5.34, малые габариты прессов недостаточно ощущаются из-за массивных гидроприводов.

Таким образом, современные технологические процессы производства высококачественных деталей из металлических порошков обеспечены разработанным отечественным прессовым оборудованием. При этом простота сборки производимых специализированных прессов позволяет изготавливать их для собственных нужд машиностроительным предприятиям, не специализированным на выпуске гидравлических прессов. Эти предприятия заинтересованы в наличии у них описанных прессов для производства продукции, соответствующей профилю этих предприятий, и способны изготовить такие прессы на собственной базе.

Крупный пресс, разработанный под руководством авторов данной монографии и изготовленный на специализированном предприятии, приведен на рис. 5.42. Он содержит неподвижные верхнюю поперечину 1 и нижнюю поперечину 2, соединенные между собой колоннами 3. В верхней поперечине закреплен корпус 4 гидроцилиндра 5. Поршень 6 гидроцилиндра через шток соединен с траверсой 7. Направление траверсы 7 по колоннам 3 осуществляется направляющими втулками 8. В траверсе неподвижно закреплен верхний пуансон 9. На нижней поперечине 2 закреплен главный гидроцилиндр 10 с поршнем 11 и штоком 12 и соосно с ним расположенный вспомогательный гидроцилиндр 13, содержащий шток 12 и гильзу 14. Гильза 14 вспомогательного гидроцилиндра соединена с матрицей 16, при этом шток 12 вспомогательного гидроцилиндра 13 является одновременно штоком главного гидроцилиндра 10, а гильза 14 вспомогательного гидроцилиндра 13 установлена в полости главного гидроцилиндра 10.

Этот пресс разработан и изготовлен в рамках государственного контракта № 11411.1003704.05.038 от 10 октября 2011 г. на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Разработка и технологическое обеспечение серийного производства гаммы гидравлических прессов тройного действия с числовым программным управлением для точной объемной штамповки». Разработанной конструкторской документации была присвоена литера O1.



Рис. 5.42. Гидравлический пресс тройного действия

Техническая характеристика пресса приведена в табл. 51.

Предложенная конструкция пресса отличается простотой изготовления и низкой металлоемкостью. Станина колонного типа наиболее рациональна с позиции металлоемкости и обеспечения необходимой жесткости пресса. Упругая деформация колонн при деформировании заготовок компенсируется величиной рабочего хода пуансона с помощью системы числового программного управления. Конструкция цилиндра в цилиндре, реализованная в нижней части пресса, способствует повышению жесткости пресса и обеспечивает необходимую соосность расположения матрицы и нижнего пуансона.

Номинальная сила:	MH
Верхний цилиндр	8
Вспомогательный цилиндр	6
Главный цилиндр	8
Номинальная возвратная сила:	
Верхний цилиндр	0,8
Вспомогательный цилиндр	0,6
Главный цилиндр	0,8
Ход рабочих частей пресса:	мм
Ход ползуна	800
Ход вспомогательного цилиндра	1400
Ход главного цилиндра	1000
Открытая высота	4000
Максимальная скорость перемещения:	мм/сек
Верхний цилиндр	300
Вспомогательный цилиндр	300
Главный цилиндр	300
Производительность	90 шт/час
Номинальное давление жидкости	32 МПа
Тип привода	насосно-
	аккумуляторный
Суммарная мощность электродвигателей	55 кВт
Габаритные размеры:	ММ
слева-направо	3600
спереди-назад	1900
высота над уровнем пола	6400
высота пресса	9000

Табл. 51. Техническая характеристика специализированного пресса тройного действия

### 6. ВЫБОР И ПРИМЕНЕНИЕ ОПИСАННЫХ ВЫШЕ ОПЕРАЦИЙ В ПРОЦЕССАХ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ТИПА СТАКАНОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТОЛЩИНАМИ СТЕНОК

## 6.1. Схемы вытяжки с утонением стенки и решаемые задачи

Изготовление деталей с относительно тонкой (по отношению к диаметру прошиваемой полости) стенкой холодной закрытой прошивкой заготовок из материалов на железной основе ограничено недостаточным сопротивлением пуансонов усталости. Вследствие этого изготавливают закрытой прошивкой детали, у которых отношение внешнего диаметра к диаметру полости составляет 1,5 ... 2. Выше (см. рис. 2.4) было показано, что при приблизительно таком соотношении диаметров удельная сила закрытой прошивки имеет минимальное значение. На следующих за закрытой прошивкой технологических операциях производят утонение стенки при одновременном увеличении глубины полости детали. Заметим, что такое построение технологического процесса, кроме повышения стойкости инструмента, имеет еще одно преимущество.

Выше, в комментарии к рис. 1.15, было показано, что технологические возможности холодной закрытой прошивки ограничены удержанием на рабочем торце пуансона в процессе деформирования заготовки слоя смазочного материала. Начальная поверхность удерживающего смазочный материал пятна контакта между заготовкой и рабочим торцом прошивного пуансона увеличивается многократно при растяжении его на боковую поверхность прошитой полости, при этом смазочный материал истончается вплоть до разрыва его слоя. Поэтому, чем на меньшую глубину необходимо осуществить закрытую прошивку, тем меньше острота проблемы смазывания исходной заготовки.

При осуществлении утонения стенки детали с одновременным увеличением глубины ее полости в промышленности наибольшее применение нашла вытяжка с утонением стенки. Технологическую операцию вытяжки с утонением стенки [54] принято делить на несколько этапов. Первый этап – штамповка дна, требующая приложения значительной силы, величина которой зависит от формы и размеров дна, угла конусности матрицы, напряжения текучести материала заготовки и условий контактного трения. Штамповка дна характеризуется малой степенью деформации, что в сочетании с промежуточной термической обработкой может привести к значительному росту зерна в материале. Поэтому при штамповке предусматривают коническую осадку дна (рис. 6.1, а), обеспечивающую повышение степени деформации. Степень деформации определяется по формуле  $e_i = \beta \ln(F_0 / F_i)$ , где  $F_0$  – площадь поперечного сечения стенки стакана до вытяжки,  $F_i$  – площадь поперечного сечения стенки стакана после i – го перехода вытяжки,  $\beta = 1, 0 \dots 1, 155$  – коэффициент Лоде.

На втором этапе производят утонение стенки заготовки (рис.  $6.1, \delta$ ). Сила утонения стенки, как правило, меньше силы осадки дна и мало изменяется в ходе этапа утонения. На третьем этапе осуществляется протягивание кромки заготовки через матрицу (рис.  $6.1, \epsilon$ ), сила падает до нуля, операция заканчивается.

Напряжения контактного трения между матрицей и заготовкой, пуансоном и заготовкой имеют различное направление.

В результате увеличения длины заготовки при принудительном утонении ее стенки, напротив очага пластической деформации пуансон обгоняет деформируемый металл, и напряжения контактного трения на внутренней поверхности заготовки совпадают с направлением движения металла и поэтому являются активно направленными. Они затягивают заготовку в матрицу, уменьшая осевые растягивающие напряжения, создаваемые действием пуансона на дно формируемой детали.



Рис. 6.1. Вытяжка заготовки с исходными размерами  $D_0$  и  $S_0$  через матрицу: a – обжим дна;  $\delta$  – утонение стенки заготовки; e – протягивание кромки заготовки через матрицу;  $\alpha$  – угол наклона образующей матрицы,  $\beta$  – угол наклона образующей пуансона, P – деформирующая сила

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Применяют вытяжку через одну, две и большее число матриц. Считают, что вытяжка чрез две матрицы способствует увеличению допустимой степени деформации заготовки и уменьшению разностенности изготавливаемой детали. Применяют последовательную вытяжку через две матрицы, когда деформирование заготовки в нижней матрице начинается после полного ее прохождения через верхнюю матрицу (рис. 6.2).

Напряжения и силы при последовательной вытяжке через две матрицы определяются так же, как при вытяжке через одну. Однако при этом надо учитывать упрочнение материала в верхней матрице, сопровождаемое возрастанием деформирующей силы при прохождении заготовки через нижнюю матрицу.

Альтернативой по отношению к последовательной является одновременная вытяжка, когда заготовка поступает в нижнюю матрицу раньше, чем пройдет через верхнюю (рис. 6.3). Возможность осуществления одновременной вытяжки ограничена длиной полуфабриката.



Рис. 6.2. Последовательная вытяжка с утонением стенки через две матрицы: a – вытяжка через верхнюю матрицу;  $\delta$  – завершение прохождения заготовки через верхнюю матрицу; e – вытяжка через нижнюю матрицу;  $D_0$  – диаметр исходной заготовки;  $S_0$  – толщина стенки исходной заготовки;  $\alpha_B$  – угол наклона образующей верхней матрицы;  $\alpha_H$  – угол наклона образующей нижней матрицы;  $\beta$  – угол наклона образующей пуансона; P – деформирующая заготовку сила

При одновременной вытяжке деформирующая заготовку сила больше, чем при вытяжке через одну матрицу с равной степенью деформации. Увеличение силы не всегда связано с дополнительной ее составляющей, расходуемой на преодоление трения по пуансону в промежутке между матрицами. При определенных условиях контакт заготовки с пуансоном может отсутствовать в результате действия распорных сил в кольцевой зоне заготовки между матрицами. Действие таких сил является следствием разности скоростей вытекания металла из верхней и нижней матриц. Затрачиваемая при этом работа является причиной увеличения технологической силы, при этом, увеличение силы может быть различным и зависеть от соотношения степеней деформации в каждой из матриц, углов конусности матриц, расстояния между их калибрующими поясками.

При оценке предельной деформации исходят из прочности сечения стенки изделия при выходе из нижней матрицы, при использовании линейной схемы напряженного состояния. Полагают, что разрушение наступает тогда, когда наибольшее растягивающее напряжение достигает напряжения текучести материала. Однако, если пуансон имеет существенную конусность ( $\beta = 1^{\circ}30'$ ) и проводят последовательную вытяжку через две или более матриц с большим межматричным пространством, возможно разрушение стенки изделия при выходе не из нижней, а из верхней матрицы.



Рис. 6.3. Одновременная вытяжка с утонением стенки через две матрицы: a – начало вытяжки через верхнюю матрицу; b – одновременная вытяжка через две матрицы; b – завершение вытяжки через нижнюю матрицу; D – диаметр исходной заготовки; S – толщина стенки исходной заготовки; α – угол наклона образующей верхней матрицы; а – угол наклона образующей нижней матрицы; β – угол наклона образующей пуансона; P – деформирующая заготовку сила

В другом методе оценки критерием предельной деформации является не наибольшее растягивающее напряжение, а степень поврежденности металла микродефектами и ее количественный показатель – использование ресурса пластичности (ИРП). Предельным является полное исчерпание ресурса пластичности. Практическое использование этого критерия возможно тогда, когда удается функционально выразить показатель ИРП через технологические параметры вытяжки. При этом предельная деформация не является однозначно определенной величиной и зависит не только от технологических параметров, но и от случайных отклонений каждого из них. Поэтому величина предельной степени деформации должна подчиняться законам математической статистики.

Значительное увеличение предельной степени деформации обеспечивается использованием двух или большего числа матриц. Исследователи объясняют этот эффект предварительным упрочнением зоны опасного сечения при прохождении заготовки через верхнюю матрицу и положительным влиянием трения по поверхности контакта заготовки с пуансоном. Увеличение расстояния между матрицами способствует увеличению предельной деформации. Полагают, что положительное влияние этого параметра обеспечено как большей протяженностью участка контакта заготовки с пуансоном, так и действием распирающей силы, которая приводит к изменению схемы напряженного состояния в очаге пластической деформации, аналогично наложению дополнительной силы от буфера на торец заготовки. Рекомендуется расстояние между матрицами назначать в пределах (0,5*d* ... 0,8*d*).

К размерам оснастки, влияющим на предельную степень деформации, относятся радиусы закругления рабочих кромок матриц и пуансона, углы конусности матриц, шероховатость их рабочих поверхностей. С увеличением угла конусности силы деформирования, как тянущая, так и общая, возрастают. Наиболее интенсивно это проявляется при малых степенях деформации. Уменьшение угла ведет к росту общей силы и к снижению тянущей силы вытяжки, которая действует в расположенном вблизи донной части изделия опасном сечении, что способствует повышению его сопротивлению разрушению.

Исследование влияния трения показало, что условия трения зависят от скорости вытяжки. Установлено, что для каждой скорости деформирования следует применять смазку определенной вязкости, обеспечивающую жидкостное трение. Снижение контактных напряжений позволяет интенсифицировать вытяжку путем более полного использования пластических свойств материала, сокращения числа технологических переходов, а также повысить точность, качество штампуемых изделий и увеличить стойкость инструмента.

Образование разрушения в выходном сечении зависит от тянущей силы со стороны пуансона и напряжений трения, действующих на поверхности контакта заготовки с пуансоном. Чем больше величина напряжений трения, тем больше предельно допустимая степень деформации. Однако существенное ухудшение условий трения на поверхности пуансона приводит к снижению качества деталей [55] и повышенному износу пуансона, увеличивает силу штамповки.

Предотвращение и исправление разностенности деталей может быть осуществлено путем создания дополнительной силы, действующей на то-

рец заготовки [56]. В кольцевом сечении очага пластической деформации, вследствие исходной разностенности заготовки, имеют место слабые и сильные участки, требующие соответственно меньших и больших деформирующих сил. Поскольку торец заготовки, находящийся под давлением буфера, остается ровным на протяжении всего этапа деформирования, то происходит перераспределение металла в окружном направлении. Это позволяет регулировать разностенность при вытяжке через две матрицы. При таком деформировании сжимающие напряжения от возникающей в кольцевом участке межматричного пространства осевой силы способны привести кольцевой межматричный участок заготовки в пластическое состояние.

Величина осевой силы зависит от соотношения степеней деформации в верхней и нижней матрицах и определяется разностью между скоростью истечения металла из верхней матрицы и скоростью его вхождения в нижнюю. Поэтому вытяжку через две и более матрицЫ применяют для уменьшения разностенности и кривизны деталей, а также для достижения большей степени деформации.

В работе [54] построена математическая модель зависимости предельной степени деформации от приведенных в табл. 52 факторов.

Факторы	Обозначения	Уровни варьирования
Количество матриц	Ν	1; 2
Относительная толщина стенки заготовки, %	$S_{0}^{-} / D_{0}^{-} \cdot 100$	3,6; 7,2
Радиус скругления кромки пуансона, мм	r <sub>п</sub>	2; 5
Угол конусности пуансона, град.	β <sub>π</sub>	0,5; 1; 1,5
Угол конусности матрицы, град.	α"	5; 15; 25
Степень предварительной деформации заготовки, %	$e_{_{i0}}$	0; 40; 80

Табл. 52. Факторы в исследовании предельной деформации вытяжки

При проведении эксперимента в каждом опыте из матрицы его плана достигали разрушения заготовки подбором матриц с соответствующим диаметром калибрующего пояска. Во всех случаях вытяжки через две матрицы (N=2) угол наклона образующей верхней матрицы  $\alpha_{\rm B} = 150$ , относительное (по отношению к диаметру матрицы) расстояние между поясками матриц составляло 1,4.

После проведения эксперимента, расчета всех коэффициентов математической модели и статистического анализа результатов эксперимента из модели были исключены члены, статистическая значимость которых не подтвердилась.

### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Построенная математическая модель имеет следующий вид:

$$e_{i} \operatorname{mped} [\%] = 108,21 - 3,48r_{n} + 23,76\beta_{n} - 0,67e_{i0} - 8,41N^{2} + 0,0026e_{i0}^{2} + 2,98NS_{0} / D_{0} + 2,71N_{rn} - 0,26N\alpha_{M} + 0,26Ne_{i0} - (140) - 2,82\beta_{n}S_{0} / D_{0} - 0,018e_{i0}S_{0} / D_{0} - 0,039r_{n}e_{i0} + 0,13\beta_{n}e_{i0}.$$

В этой модели большое количество членов описывает совместное влияние факторов (в этих членах после коэффициента стоят произведения факторов). Совместное влияние означает, что влияние одного из факторов, входящих в произведение, зависит от того, на каком уровне находится другой входящий в это произведение фактор. Полученная модель (140<sub>27</sub>) позволяет определять оптимальные сочетания значений факторов, которые дают возможность осуществить наибольшую величину предельной деформации.

### 6.2. Аналитическое исследование вытяжки с утонением стенки



Расчетная схема операции вытяжки через одну матрицу приведена на рис. 6.4 [57].

Рис. 6.4. Расчетная схема вытяжки с утонением стенки

Принято, что кинематически возможное течение в зоне 1 происходит по радиусу р. Тогда соотношения, определяющие скорости деформаций, имеют вид:

$$\begin{cases} \xi_{\rho} = \frac{\partial v_{\rho}}{\partial \rho}, \\ \xi_{\phi} = \frac{v_{\rho}}{\rho}, \\ \eta_{\phi\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial v_{\rho}}{\partial \phi}. \end{cases}$$
(141)

Подстановкой их в условие несжимаемости материала  $\xi_{\rho} + \xi_{\phi} = 0$  и решением полученного уравнения, определено

$$v_{\rho} = \frac{f(\phi)}{\rho}.$$
 (142)

Подстановка формулы (142) в соотношения (141) позволила найти выражения скоростей деформаций:

$$\begin{cases} \xi_{\rho} = -\frac{f(\phi)}{\rho^{2}}, \\ \xi_{\phi} = \frac{f(\phi)}{\rho^{2}}, \\ \eta_{\phi\rho} = \frac{f'(\phi)}{\rho^{2}}. \end{cases}$$
(143)

Интенсивность скоростей деформаций определена по известному выражению:

$$\xi_{i} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\left(\xi_{\rho} - \xi_{\theta}\right)^{2} + \left(\xi_{\theta} - \xi_{\phi}\right)^{2} + \left(\xi_{\phi} - \xi_{\rho}\right)^{2} + \frac{3}{2} \eta_{\phi\rho}^{2}} = \frac{\sqrt{2}}{3\rho^{2}} \sqrt{6f^{2}(\phi) + \frac{3}{2} \left[f'(\phi)\right]^{2}}.$$
 (144)

С учётом формулы (144) и третьего выражения системы (143), по известному соотношению Леви-Мизеса определено касательное напряжение:

$$\tau_{\varphi \rho} = \frac{1}{3} \frac{\eta_{\varphi \rho}}{\xi_i} = \frac{f'(\varphi)}{\sqrt{12 f^2(\varphi) + 3[f'(\varphi)]^2}} = f_1(\varphi).$$
(145)

Уравнения равновесия в данном случае имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\rho\phi}}{\partial \phi} + \frac{\sigma_{\rho} - \sigma_{\phi}}{\rho} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{\phi}}{\partial \phi} + 2\tau_{\phi\rho} = 0. \end{cases}$$
(146)

Из второго уравнения системы (146<sub>33</sub>) следует:

$$\sigma_{\varphi} = -2\int \tau_{\varphi\rho} \partial \varphi + f(\rho).$$
(147)

Из условия пластичности

$$\sigma_{\rho} - \sigma_{\phi} = \beta \tag{148}$$

следует, что

$$\sigma_{\rho} = \sigma_{\phi} + \beta \,. \tag{149}$$

### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Первое уравнение системы (146) с учетом выражений (148) и (149) преобразовано к виду:

$$\rho \frac{\partial \sigma_{\varphi}}{\partial \rho} + \beta = -\frac{\partial \tau_{\varphi \rho}}{\partial \varphi}.$$
 (150)

Так как левая часть этого уравнения в соответствии с выражением (147) зависит только от ρ, а правая, в соответствии с формулой (145) – только от φ, то обе эти части должны быть равны постоянной величине *C*, откуда

$$_{\varphi\rho} = -C\varphi + C_1, \tag{151}$$

$$\sigma_{\varphi} = (C - \beta) \ln \rho + f_2(\varphi) + C_2.$$
(152)

Произвольные постоянные *C* и *C*<sub>1</sub> определены из граничных условий:  $\tau_{_{\phi\phi}} = 0,5\beta\mu_1$  при  $\phi = 0$  и  $\tau_{_{\phi\phi}} = \beta\mu$  при  $\phi = \alpha$ , откуда:

$$C = \beta(0,5\mu_1 - \mu)/\alpha , C_1 = 0,5\beta\mu_1 .$$
 (153)

Первое граничное условие требует пояснения. Из эпюры разрыва скоростей движения пуансона и деформируемого материала заготовки (рис. 6.4, справа) видно, что этот разрыв уменьшается от некоторой величины на входе в очаг деформации до нуля на выходе. Но так как данный разрыв определяет наличие и направление силы контактного трения, то, полагая с достаточной для практики точностью его изменение линейным, можно считать, что сила контактного трения по пуансону в зоне **1** определяется не коэффициентом трения µ, а его половиной.

Сравнение выражений (147) и (152) показывает, что

$$f_2(\varphi) = -2\int \tau_{\varphi\rho} \partial \varphi \,,$$

откуда с учётом формулы (151) следует, что

$$f_2(\varphi) = (C_{\varphi} - 2C_1)\varphi.$$
 (154)

В силу ее малости и для упрощения окончательных выражений результатов исследования в дальнейшем величиной  $f_2(\varphi)$  пренебрегли [58]. Тогда с учётом выражений (149) и (152)

$$\sigma_{\rho} = \beta + (C - \beta) \ln \rho + C_2. \tag{155}$$

Вследствие изменения направления скорости движения материала в зоне 2 по отношению к  $v_{\rho}$  в зоне 1, на границе между ними возникает разрыв в касательных составляющих скоростей, приводящий к существенной локализации сдвиговых деформаций. Соответственно, появляются предельные касательные напряжения  $\tau = 0.5\beta$ . Аналогичные условия имеют место и на границе между зонами 1 и 3. Кроме того, если считать, что зона 2 нагружена удельной силой q, то можно распространить полученное решение на случай

одновременной вытяжки через несколько матриц (рис. 6.5). С учетом этого произвольная постоянная  $C_2$  в выражении (155) определена из следующего граничного условия:

$$\pi (R^2 - r_0^2) \sigma_{\rho} \Big|_{\rho=b} - P_{\tau} \Big|_{\rho=b} = \pi (R^2 - r_0^2) q .$$
(156)

Первое выражение этого уравнения написано с учётом известной теоремы (с. 174 учебника [2]) об определении силы в зависимости от напряжения, переменного по направлению, но постоянного по величине.



Рис. 6.5. Одновременная вытяжка через две матрицы

Сила от действия касательных напряжений  $\tau = 0.5\beta$  равна:

$$P_{\tau}\Big|_{\rho=b} = 2\pi \int_{r_0}^{R} \tau \sin \varphi \rho_1 d\rho_1 = 2\pi \int_{0}^{\alpha} \tau \sin \varphi (r_0 + b \sin \varphi) b d\varphi =$$

$$= \pi \beta b \bigg[ r_0 (1 - \cos \alpha) + \frac{b}{4} (2\alpha - \sin 2\alpha) \bigg].$$
(157)

Для облегчения практических расчётов радианное значение угла а в выражениях (153) и (157) в силу малости заменено на sina. В результате получено:

$$P_{\tau}|_{\rho=b} = \pi\beta b(1 - \cos\alpha)(r_0 + 0.5b\sin\alpha).$$
(158)

Подстановка выражения (155) и (158) в уравнение (156), позволила определить произвольную постоянную  $C_2$ :

$$C_2 = -\beta - (C - \beta) \ln b + \frac{\beta b (1 - \cos \alpha) (r_0 + 0.5b \sin \alpha)}{R^2 - r_0^2} + q.$$
(159)

Напряжение в протянутой части стенки определено из следующего выражения:

$$\sigma_{\rm c} = \sigma_{\rm \rho} \Big|_{\rho=a} + \frac{P_{\tau} \big|_{\rho=a}}{\pi (r^2 - r_0^2)}.$$
(160)

Аналогично выражению (158) установлено, что

$$P_{\tau}|_{\rho=a} = \pi\beta a (1 - \cos\alpha)(r_0 + 0.5a\sin\alpha).$$
 (161)

Подстановкой выражений (153), (155), (159), (161) в равенство (160) с учетом, что  $\beta = 1,155$ , а

$$b = \frac{R - r_0}{\sin \alpha}, \quad a = \frac{r - r_0}{\sin \alpha}, \tag{162}$$

окончательно получено:

$$\sigma_{\rm c} = 1.155 \left[ \left( 1 + \frac{\mu - 0.5\mu_1}{\sin \alpha} \right) \ln \frac{R - r_0}{r - r_0} + \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \right] + q \,. \tag{163}$$

При вытяжке через одну матрицу трение между пуансоном и зоной **2** (рис. 6.4), отсутствует, поскольку заготовку одевают на пуансон без натяга, и следует положить q = 0. В результате осевое напряжение в протянутой части стенки при вытяжке через одну матрицу равно:

$$\sigma_{\rm c} = 1.155 \left[ \left( 1 + \frac{\mu - 0.5\mu_1}{\sin \alpha} \right) \ln \frac{R - r_0}{r - r_0} + \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \right].$$
(164)

Так как угол матрицы α при вытяжке с утонением стенки невелик, то деформированное состояние заготовки является стационарным и достаточно равномерным в поперечном направлении. В связи с этим среднее по очагу пластической деформации напряжение текучести определено по формуле:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{s0} + \sigma_{sK}}{2}, \qquad (165)$$

где конечное напряжение текучести  $\sigma_{sk}$  определено по значению накопленной деформации протянутой части стенки:

$$e_i = 1,155 \ln \frac{R^2 - r_0^2}{r^2 - r_0^2}.$$
 (166)

Полная сила вытяжки равна сумме силы, необходимой для осуществления пластической деформации, и силы, необходимой для преодоления пуансоном трения о заготовку в очаге пластической деформации:

$$P = \sigma_s \Big[ \pi (r^2 - r_0^2) \sigma_c + \beta 0.5 \mu_1 2 \pi r_0 (b - a) \Big].$$
(167)

В соответствии с эпюрой на рис. 6.4 в данное выражение подставлено 0,5µ1 вместо µ1.

Подстановка в равенство (167) формул (162) и (164), позволила окончательно получить:

$$P = 3,63\sigma_s \left\{ \left[ \left( 1 + \frac{\mu - 0,5\mu_1}{\sin\alpha} \right) \ln \frac{R - r_0}{r - r_0} + \frac{1 - \cos\alpha}{\sin\alpha} \right] (r^2 - r_0^2) + \frac{\mu_1 r_0 (R - r)}{\sin\alpha} \right\}.$$
 (168)

Из условия  $\partial P/\partial \alpha = 0$  найден оптимальный угол конусности матрицы, при котором сила вытяжки является минимальной:

$$\cos \alpha_P = \frac{1}{1 + (\mu - 0.5\mu_1) \ln \frac{R - r_0}{r - r_0} + \frac{\mu_1 r_0 (R - r)}{r^2 - r_0^2}}.$$
(169)

Поскольку для нормального протекания процесса вытяжки нельзя допускать в протянутой части стенки заготовки появления пластических деформаций, приводящих к её разрыву, то деформацию за один переход ограничивают, руководствуясь условием:

$$\sigma_{\rm c} \le \frac{\sigma_{s\kappa}}{\sigma_s} \,. \tag{170}$$

Из данного условия и выражения (164) следует, что существует и оптимальный угол конусности матрицы, при котором растягивающее напряжение в стенке протянутой части заготовки имеет минимальную величину, что, соответственно, позволяет осуществить наибольшую деформацию стенки за один переход. Этот угол определен из условия  $\partial \sigma_c / \partial \alpha = 0$ :

$$\cos \alpha_{\sigma} = \frac{1}{1 + (\mu - 0.5\mu_1) \ln \frac{R - r_0}{r - r_0}}.$$
(171)

Сравнение выражений (169) и (171) позволило сделать вывод: при вытяжке с утонением стенки угол конусности матрицы, обеспечивающий минимальную величину силы вытяжки, не совпадает с углом, обеспечивающим минимальную величину растягивающего напряжения в протянутой части стенки, превышая последний. Сравнительные значения оптимальных углов представлены в табл. 52. Из табл. 52 видно, что с увеличением степени деформации при вытяжке с утонением стенки величина оптимальных углов конусности матрицы также увеличивается. Это подтверждается известными экспериментальными данными, с которыми совпадают и сами значения оптимальных углов:  $\alpha_{p_3} = 10 - 15^{\circ} [59, 60], \alpha_{\sigma_3} = 6 - 12^{\circ} [61].$ 

При R = 40 мм,  $r_0 = 30$  мм, r = 38 мм,  $\mu = \mu_1 = 0,3$  согласно формулам (169) и (171)  $\alpha_p = 20^\circ$ ,  $\alpha_g = 15^\circ$ . Сравнив полученные значения с соответствующим столбцом табл. 53, можно сделать вывод, что с увеличением коэффициента трения при вытяжке с утонением стенки величина оптимальных углов конусности матрицы также увеличивается. Это тоже подтверждается известными экспериментальными данными [60].

**Табл. 53.** Сравнение оптимальных углов конусности матрицы при вытяжке с утонением стенки (R = 40 мм,  $r_0 = 30$  мм,  $\mu = \mu_1 = 0,1$ )

<i>г</i> , мм	39,0	38,5	38,0	37,5	37,0	36,5
$e_i$	0,138	0,213	0,291	0,374	0,463	0,557
$\alpha_{P}$	8°	10°	12°	14°	15°	17°
ασ	6°	7°	8,5°	10°	11°	12°

В экспериментально-производственной практике вытяжку с утонением стенки традиционно характеризуют следующими условными показателями:

1) давлением вытяжки, равным отношению силы вытяжки к площади поперечного сечения протянутой стенки:

$$q_{\rm c} = \frac{P}{\pi (r^2 - r_0^2)};\tag{172}$$

 коэффициентом вытяжки, равным отношению толщины протянутой стенки к исходной толщине:

$$k = \frac{r - r_0}{R - r_0}.$$
 (173)

Важно отметить, что давление вытяжки  $q_{\rm c}$  не равно напряжению в протянутой части стенки  $\sigma_{\rm c}$ .

Для обоснованного решения вопроса о целесообразности замены с целью увеличения допустимой степени деформации вытяжки через одну матрицу на одновременную вытяжку через две последовательно установленные матрицы (рис. 6.5), получены соответствующие расчётные выражения.

В соответствии с выражением (163) напряжение в части стенки, протянутой через нижнюю матрицу, определяется выражением

$$\sigma_{c2} = 1,155 \left[ \left( 1 + \frac{\mu - 0,5\mu_1}{\sin \alpha} \right) \ln \frac{r_1 - r_0}{r - r_0} + \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \right] + q.$$
(174)
Удельная сила *q*, действующая на верхнюю границу очага пластической деформации в нижней матрице, определяется суммой следующих напряжений. Это растягивающее напряжение от деформирования заготовки в верхней матрице, растягивающее напряжение, вызванное трением на калибрующем пояске верхней матрицы, и сжимающее напряжение от силы трения, созданной пуансоном на внутренней поверхности заготовки на участке между верхним и нижним очагами пластической деформации:

$$q = 1,155 \left[ \left( 1 + \frac{\mu - \mu_1}{\sin \alpha} \right) \ln \frac{R - r_0}{r_1 - r_0} + \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \right] + \sigma_{\text{трм}} + \sigma_{\text{трп}} .$$
(175)

В связи с тем, что, в отличие от нижнего очага пластической деформации, в верхнем очаге пуансон значительно опережает скорость течения металла по всей контактной поверхности, в формулу (175) подставлена не половина, а полное значение коэффициента трения µ<sub>1</sub>.

Растягивающее напряжение от трения на калибрующем пояске верхней матрицы (рис. 6.5) равно:

$$\sigma_{\rm TPM} = \beta \mu \frac{2\pi r_1 h_{\rm K}}{\pi (r_1^2 - r_0^2)} = 1,155 \frac{2\mu r_1 h_{\rm K}}{r_1^2 - r_0^2}.$$
 (176)

Для определения сжимающего напряжения от силы трения, прикладываемой пуансоном на участке длиной l, использовано значение коэффициента трения, равное  $0,5\mu_1$ . Принятие уменьшенной величины коэффициента трения учитывает то, что давление со стороны заготовки на пуансон в промежутке между матрицами значительно меньше аналогичного давления в очаге пластической деформации, обусловленного подпором от обжатия заготовки в конической полости матрицы. Принятое на участке длиной lзначение коэффициента трения можно уточнить экспериментально, что не повлияет на последующие математические выкладки и структуру получаемых формул. Учитывая изложенное, записано, что

$$\sigma_{\rm TPII} = -0.5\beta\mu_1 \frac{2\pi r_0 l}{\pi (r_1^2 - r_0^2)} = -1.155 \frac{\mu_1 r_0 l}{r_1^2 - r_0^2}.$$
 (177)

Подстановкой выражений (175), (176) и (177) в формулу (174), получено:

$$\sigma_{c2} = \sigma_{c} + 1.155 \left( \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} - \frac{0.5\mu_{1}}{\sin \alpha} \ln \frac{R - r_{0}}{r_{1} - r_{0}} - \frac{\mu_{1}r_{0}l - 2\mu r_{1}h_{\kappa}}{r_{1}^{2} - r_{0}^{2}} \right),$$
(178)

где  $\sigma_{c}$  определяется по формуле (164).

Выражение (178) показывает, что возможность увеличения допустимой деформации при одновременной вытяжке через две матрицы определяется знаком выражения в скобках. Это выражение, с одной стороны, учитывает повышение растягивающего напряжения в протянутой стенке из-за увеличения количества поверхностей сдвига, обусловленного добавлением второго очага пластической деформации, а с другой стороны, снижение растягивающего напряжения дополнительными силами трения со стороны пуансона. Если указанный член является положительным (например, при  $\mu_1 = 0$  или малом значении *l*), то вытяжка через две матрицы менее эффективна, чем вытяжка через одну матрицу.

Из формулы (178) видно, что эффективность вытяжки через две матрицы возрастает с увеличением коэффициента трения  $\mu_1$  и расстояния между матрицами l, а также с уменьшением  $r_p$ , то есть с максимально возможным увеличением деформации в верхней матрице по сравнению с нижней. Полученные закономерности хорошо подтверждаются экспериментально [62].

Увеличение коэффициента трения по пуансону µ<sub>1</sub> целесообразно ограничивать, так как при этом возрастают тепловыделение на контактной поверхности и опасность налипания металла заготовки на пуансон, что снижает стойкость инструмента и приводит к появлению задиров и продольных царапин на внутренней поверхности изделия, а также к затруднению его снятия с пуансона.

Полная сила вытяжки через две матрицы равна сумме силы, необходимой для осуществления пластической деформации, и силы, необходимой для преодоления пуансоном трения о заготовку:

$$P_{2} = \sigma_{s} \left[ \pi (r^{2} - r_{0}^{2}) \sigma_{c2} + \beta 2 \pi r_{0} \left( 0.5 \mu_{1} \frac{r_{1} - r}{\sin \alpha} + 0.5 \mu_{1} l + \mu_{1} \frac{R - r_{1}}{\sin \alpha} \right) \right] = \pi \sigma_{s} \left[ (r^{2} - r_{0}^{2}) \sigma_{c2} + 1.155 \mu_{1} r_{0} \left( \frac{2R - r_{1} - r}{\sin \alpha} + l \right) \right].$$
(179)



Для ещё большего увеличения степени деформации на производстве применяется одновременная вытяжка через три последовательно установленные матрицы (рис. 6.6).

**Рис. 6.6.** Одновременная вытяжка через ри матрицы

Аналогично выкладкам, выполненным для двух матриц, в случае вытяжки через три матрицы можно получить следующие расчётные выражения:

$$\sigma_{c3} = \sigma_{c} + 1.155 \left( 2 \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} - \frac{0.5\mu_{1}}{\sin \alpha} \ln \frac{R - r_{0}}{r_{1} - r_{0}} - \frac{\mu_{1}r_{0}l_{1} - 2\mu r_{2}h_{\kappa 1}}{r_{2}^{2} - r_{0}^{2}} - \frac{\mu_{1}r_{0}l - 2\mu r_{1}h_{\kappa}}{r_{1}^{2} - r_{0}^{2}} \right),$$
(180)

$$P_3 = \pi \sigma_s \left[ (r^2 - r_0^2) \sigma_{c3} + 1,155 \mu_1 r_0 \left( \frac{2R - r_1 - r}{\sin \alpha} + l + l_1 \right) \right].$$
(181)

Условие прочности (170) позволяет определить предельную деформацию заготовки за один переход без разрыва протягиваемой стенки. Таким образом, данное условие позволяет установить количество переходов вытяжки, необходимое для изготовления заданного изделия. Однако при определённом количестве переходов может появиться другой вид разрушения – трещины в стенке изделия, обусловленные исчерпанием ресурса пластичности. Образование трещин объясняется следующим.

С учётом плоской деформации относительное гидростатическое давление при вытяжке с утонением стенки определяется выражением:

$$\sigma = \sigma_{\theta} = \frac{\sigma_{\phi} + \sigma_{\rho}}{2}.$$
 (182)

Подстановка в него формул (149), (153), (155), (159) и (162) при  $\rho = a$ , то есть на выходе из конического участка матрицы, где накопленная деформация является наибольшей, позволила получить:

$$\sigma = 0.577 \left[ 2 \left( 1 + \frac{\mu - 0.5\mu_1}{\sin \alpha} \right) \ln \frac{R - r_0}{r - r_0} + \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} - 1 \right].$$
 (183)

На основе выражений (183) и (166) предложена следующая методика прогнозирования трещинообразования при вытяжке с утонением стенки.

Если вытяжка осуществляется за несколько переходов, параметры которых определяются по условию прочности (170), то для каждого *i*-го перехода, характеризуемого начальным  $R_i$  и конечным гі наружными радиусами заготовки, выполняются следующие расчеты.

1. Определяется по формуле (183) величина относительного гидростатического давления в опасной точке.

2. Для данной величины гидростатического давления по диаграмме пластичности деформируемого материала находится деформация разрушения  $e_n$ .

3. Находится суммарная накопленная деформация по формуле (166),

С подстановкой в нее наружного радиуса *R*, который заготовка имела перед первым переходом вытяжки.

4. Производится сравнение  $e_i c e_p$ ; если  $e_i \ge e_p$ , то делается вывод, что в стенке вытягиваемого изделия появятся трещины.

### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Пример. Проведено исследование трещинообразования при холодной вытяжке с утонением стенки заготовки из стали 35. Исходный стакан для вытяжки был получен холодной закрытой прошивкой и имел наружный радиус R = 26,7 мм при радиусе полости  $r_0 = 20$  мм. Перед первой вытяжкой был выполнен отжиг исходного стакана. Перед каждой вытяжкой заготовку фосфатировали и омыливали. Для вытяжек использовали один пуансон, радиус которого был равен указанному радиусу полости стакана, и сменный набор вытяжных матриц, радиусы которых указаны в табл. 54, а угол конусности  $\alpha = 10^{\circ}$ . Трещины на наружной поверхности стенки вытягиваемой заготовки были зафиксированы на пятом переходе вытяжки. Требуется выполнить сопоставительное прогнозирование трещинообразования.

i	R <sub>i</sub>	r <sub>i</sub>	σ		e <sub>i</sub>
1	26,7	26	-0,381	1,8	0,145
2	26,0	25	-0,286	1,5	0,381
3	25,0	24	-0,232	1,4	0,665
4	24,0	23	-0,147	1,3	1,023
5	23,0	22	0,009	1,2	1,519

Табл. 54. Расчёт параметров трещинообразования при холодной вытяжке с утонением стенки



**Рис. 6.7.** Диаграмма пластичности стали 35 при комнатной температуре

Решение. С учётом хорошей смазки принято, что  $\mu = \mu_1 = 0,05$  (если принять и  $\mu = \mu_1 = 0,1$ , результаты расчётов изменятся незначительно). По формуле (183<sub>70</sub>) вычислено относительное гидростатическое давление в каждом переходе, для которого по диаграмме пластичности стали 35, показанной на рис. 6.7, определена деформация разрушения  $e_n$ .

Затем по формуле (166) определена суммарная накопленная деформация. Для определения именно

суммарной деформации, а не её приращения за данный переход, в формулу (166) подставлено не текущее значение  $R_i$ , а радиус исходной заготовки R = 26,7 мм. Поскольку на пятом переходе  $e_i \ge e_p$ , сделан вывод, что на этом переходе начнётся трещинообразование в стенке вытягиваемого стакана.

## 6.3. Прямое выдавливание тонкостенных стаканов из толстостенных для увеличения их высоты и утонения стенки

При изготовлении полых тонкостенных деталей альтернативой применения вытяжки с утонением стенки, рассмотренной выше в п. 6.1 и 6.2, является их выдавливание из предварительно изготовленных закрытой прошивкой стаканов, имеющих большую толщину стенки.

Далее излагается материал с использованием заимствований из работы [63].

Требуется изготовить ХОШ гильзу, показанную на рис. 6.8, e, из сплошной цилиндрической заготовки. При этом фланец, имеющий диаметр  $D_1 = 40$  мм, является технологическим напуском. Сначала рассмотрена возможность изготовления рассматриваемой гильзы закрытой прошивкой из заготовки, имеющей диаметр D = 30 мм. Такая возможность оценена с использованием табл. 55.

В табл. 55 приведены данные по допустимым степеням деформации при закрытой прошивке и выдавливании заготовки. Обозначено: относительная деформация –  $\varepsilon_F = \Delta F/F_{\text{заг}}$ ;  $\Delta F = F_{\text{заг}} - F_{\text{пок}}$ ; истинная деформация –  $e_F = \ln(1 + \varepsilon_F)$ .

Формоизменяющая	Изменение и сечения и толи	поперечного цинытенки в %	Изменение диаметра, в %		
операция	$\epsilon_{F}^{}, \epsilon_{S}^{}$	$e_{_F}, e_{_S}$	$\epsilon_{_D}$ $e_{_D}$		
Закрытая прошивка	40 75	51140	_	_	
Выдавливание	60 95	92 300	5 30	5 36	

Табл. 55. Наибольшие допустимые деформации заготовок [63]

Степень деформации  $\varepsilon_F$  при закрытой прошивке детали из заготовки с диаметром  $D_2 = 30$  мм (см. рис. 6.8, в) рассчитывается как  $[D_2^2 - (D_2^2 - d_2)] / D_2^2 = 725 / 900 = 0,8$ . Это больше, чем ограниченная данными, приведенными в табл. 55, допускаемая степень деформации заготовки. Следовательно, изготовить деталь за одну операцию нельзя, поэтому следует предусмотреть промежуточный полуфабрикат (черновой стакан), показанный на рис. 6.8, б. Такой стакан изготавливают закрытой прошивкой из заготовки, приведенной на рис. 6.8, а, и имеющей диаметр  $D_{3ar} = D_{cr} = 40$  мм.

Рассматриваемым вариантом ХОШ является деформирование заготовки, показанное на рис. 6.8. На этом рисунке под обработкой поверхности понимается удаление травлением окалины, образовавшейся при отжиге заготовки, промывка, нанесение фосфатного покрытия, промывка и смазывание.



**Рис. 6.8.** Гильза, изготовленная прямым и обратным выдавливанием из сплошной заготовки: *a*) – заготовка, *б*) изготовленный закрытой прошивкой стакан в качестве полуфабриката, *в*) гильза

При проектировании операций штамповки, показанной на рис. 6.8 гильзы, площади и объемы, которые становятся понятными при рассмотрении рис. 6.8, в, рассчитывают по следующим формулам.

$$\begin{split} F_1 &= \pi D_1^{\ 2}\!/4 = \pi 40^2\!/4 = 1256,6 \text{ mm}^2; \ F_2 = \pi D_2^{\ 2}\!/4 = \pi 30^2\!/4 = 706,8 \text{ mm}^2; \\ F_3 &= \pi d^2\!/4 = \pi 25^2\!/4 = 490,9 \text{ mm}^2; \\ V_1 &= (F_1 - F_2)h_3 = 265,7 \cdot 8 = 6125 \text{ mm}^3; \ V_2 = (F_2 - F_3)h_2 = 215,9 \cdot 80 = 17272 \text{ mm}^3; \\ V_3 &= F_2 \ h_1 = 706,8 \cdot 10 = 7068 \text{ mm}^3; \ V_{obil} = V_1 + V_2 + V_3 = 30465 \text{ mm}^3. \end{split}$$

Размеры чернового стакана следующие:

$$V_{\rm obilit} = V_{\rm cr}, D_1 = D_{\rm cr}, d = d_{\rm cr}$$

при этом

$$F_{ct1} = \pi D_{ct}^{2}/4 = \pi 40^{2}/4 = 1256,6 \text{ MM}^{2}; F_{ct2} = \pi d_{ct}^{2}/4 = \pi 25^{2}/4 = 490,9 \text{ MM}^{2};$$
$$V_{ct1} = (F_{ct1} - F_{ct2}) (H_{ct} - h_{ct}); V_{ct2} = F_{ct1}h_{ct},$$

при этом  $h_{\rm cr} = h_1$ , так как при выдавливании толщина дна меняется незначительно. Следовательно,  $V_{\rm cr2} = 1256, 6 \cdot 10 = 12566$  мм<sup>3</sup>.

$$V_{\text{ofin}} = V_{\text{ct}} = V_{\text{ct}} + V_{\text{ct}2} = 30465,6 \text{ mm}^3; V_{\text{ct}1} = V_{\text{ct}} - V_{\text{ct}2} = 17899,6 \text{ mm}^3.$$

Высота стакана рассчитывается следующим образом.

$$H_{\rm ct} = V_{\rm ctl} / (F_{\rm ctl} - F_{\rm ct2}) + h_{\rm ct} = 17899,6 / 765,7 + 10 = 33,5 \text{ mm}.$$

Заготовку отрезают от прутка, диаметр которого равен диаметру чернового стакана:  $D_{aar} = D_{cr}$ .

 $V_{\text{общ}} = V_{\text{заг}} = F_{\text{заг}}H_{\text{заг}} = 1256,6H_{\text{заг}} = 30465,6 \text{ мм}^2; H_{\text{заг}} = 30465,6/1256,6 = 24,3 \text{ мм}.$ Размеры заготовок при отрезке:

$$D_{\text{ran}} = 40 \text{ MM}; H_{\text{ran}} = 24,3 \text{ MM}; F_{\text{ran}} = 1256,6 \text{ MM}^2; V_{\text{ran}} = 30465,6 \text{ MM}^2.$$

Общая величина истинной деформации при штамповке:

$$e_{FoGIII} = \ln(F_0 / F_1) = \ln[F_{3ar} / (F_2 - F_3)] = \ln(1256, 6/215, 9) = \ln 5, 8 = 176\%.$$

В п. 2.2 данной монографии на рис. 2.4 приведены графики величин относительной удельной силы закрытой прошивки. На графиках видно, что относительная удельная сила составляет более 3 напряжений текучести материала заготовки. При этом рассматриваемая сила на участке графиков, соответствующих штамповке тонкостенных стаканов (R < 2), существенно увеличивается с уменьшением толщины стенки.

На рис. 6.8 показано формоизменение заготовки, приведенной на рис. 6.8, *a*, и превращение ее в деталь типа стакана, приведенную на рис. 6.8, *б*.

В соответствии с предыдущим абзацем, уменьшение толщины стенки Sct соответствует увеличению степени деформации и силы закрытой прошивки.

При последующей операции выдавливания и формоизменении показанного на рис. 6.8, б стакана в деталь, приведенную на рис. 6.8, в, относительная удельная сила на пуансоне меньше, чем при рассмотренной выше операции закрытой прошивки. Чтобы операции закрытой прошивки и выдавливания происходили с приблизительно одинаковыми силами, степень деформации при закрытой прошивке выбрана на нижнем приведенном в табл. 55 пределе:  $e_F = 50\%$ , а при выдавливании – на верхнем пределе:  $e_F = 176 - 50 = 126\%$ . Руководствуясь этими положениями, выбраны размеры промежуточного стакана, показанного на рис. 6,8, б.

Другим примером является приведенный на рис. 6.9 технологический процесс изготовления детали с помощью ХОШ.

Определение объема детали, приведенной на рис. 6.9, *поз.* 6, проводится, например, следующим образом. Практически всегда, прежде чем реализовать технологию штамповки, для осуществления которой требуется изготовление дорогостоящей штамповой оснастки, деталь в единичном экземпляре изготавливают резанием из прутка и опробуют деталь при работе использующего ее опытного образца устройства в целом. Объем опытного образца детали может быть определен опусканием его в сосуд с водой, имеющий простейшую форму и снабженный рисками для замера объема вытесненной воды. Объем вытесненной воды равен объему детали.

Определив объем детали, форму исходной для ее штамповки заготовки выбирают так, чтобы ее диаметр несколько превышал диаметр готовой детали, и в технологическом процессе преобладали операции уменьшения

### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

диаметра заготовки. При этом будет преобладать количество операций выдавливания и вытяжки с утонением стенки по сравнению с закрытой прошивкой. Выдавливание и вытяжка требуют меньшей удельной деформирующей силы, нагружающей инструмент и уменьшающий его сопротивление усталости по сравнению с закрытой прошивкой.



Рис. 6.9. Пооперационные чертежи промежуточных полуфабрикатов при изготовлении направляющей трубы: 1 – заготовка с фасками; 2 – после закрытой прошивки;
 3 – после выдавливания; 4 – с подрезанными торцами; 5 – после вытяжки с утонением стенки; 6 – после выдавливания, подрезки дна в размер;
 ■ – отжиг; ▲ – травление, фосфатирование и нанесение смазочного материала

Заслуживает особого комментария форма полуфабриката на рис. 6.9, *nos*. 2. В этой позиции наличие осевого отростка с диаметром 43 мм продиктовано формой детали, показанной на рис. 6.9, *nos*. 6. Однако даже если бы форма готовой детали не имела придонного участка, имеющего диаметр меньший, чем диаметр изготавливаемого закрытой прошивкой стакана, показанного на рис. 6.9, *nos*. 2, такой участок следовало бы предусмотреть на этой операции, а потом деформировать его в стенку детали на последующих переходах штамповки. Это связано с тем, что при деформировании показанной на рис. 6.9, *nos*. 1 заготовки в полуфабрикат, показанный на рис. 6.9, *nos*. 2, происходит одновременно двухканальное течение металла в стенку стакана и в расположенный ниже его дна отросток. Такое двухканальное течение металла, как было показано выше в п. 2.5 данной монографии, препятствует уводу прошивающего полость в заготовке пуансона от оси матрицы. При построении технологического процесса с двухканальным течением металла деформируемой заготовки обеспечивается соосность внешней и внутренней поверхностей изготавливаемой детали.

При формоизменении выдавливанием полуфабриката, показанного на рис. 6.9, *поз.* 2, в полуфабрикат, показанный на рис. 6.9, *поз.* 3, на последнем из указанных рисунков изображено дно полости, близкое по форме к сфере. На самом деле это некая произвольно получаемая форма, поскольку на дно полости пуансон не действует. Пуансон действует на фланец полуфабриката.

Для формообразования требуемого придонного участка полости детали требуется введение в полость полуфабриката пуансона заданной формы и вытяжка с утонением стенки полуфабриката через полость матрицы, при которой матрица обжимает полуфабрикат, как показано на рис. 6.9, *noз. 5*.

Поскольку деформируемому материалу в придонной части полуфабриката при переходе с поз.4 в *поз. 5* на рис. 6.9 легче течь в направлении нижнего торца, и внешний диаметр прилегающего к торцу участка уменьшается, толщина дна полуфабриката увеличивается. Одновременно вследствие утонения стенки у части высоты полуфабриката общая высота его трубной части также увеличивается. При переходе с *поз. 5* в *поз. 6* на рис. 6.9 производится утонение верхнего участка стенки полуфабриката. Это утонение производится выдавливанием.

У детали, показанной на рис. 6.9, *поз.* 6, верхний участок стенки в ее трубной части имеет внешний и внутренний диаметры, отличающиеся от диаметров нижнего участка стенки. Однако, даже если бы деталь имела постоянные по высоте диаметры ее трубной части, операцию вытяжки с утонением стенки (между *поз.* 5 и *поз.* 6 на рис. 6.9) целесообразно комбинировать на заключительном этапе с операцией выдавливания. Это объясняется возможностью изготовления более глубокой полости без разрыва стенки с помощью комбинации указанных операций по сравнению с осуществлением только операции вытяжки с утонением стенки, без последующего выдавливания.

В комментарии нуждаются назначаемые между формоизменяющими заготовку переходами промежуточные операции отжига полуфабрикатов (значок ■) и подготовки их поверхности под последующую штамповку (значок ▲).

Выше, в п. 2.1 данной монографии, был прокомментирован вариант технологии, при котором осуществляется промежуточный отжиг полуфабрикатов между переходами штамповки. Промежуточный отжиг устраняет эффект упрочнения материала на предыдущих переходах штамповки и снижает необходимую для выполнения реализуемого перехода деформирующую силу. Однако при такой технологии стенка изготовленной детали имеет неравномерные по высоте показатели механических характеристик. В технологическом процессе, проиллюстрированном рис. 6.9, промежуточные отжиги имеют место между начальными переходами. При этом создается так называемое незавершенное производство. На этапах термообработки и подготовки поверхности полуфабрикаты складируют в контейнерах в цехе в ожидании выполнения последующего перехода штамповки. Однако между заключительными переходами штамповки (рис. 6.9, *nos. 5 и nos. 6*) операция термообработки отсутствует. Это позволяет изготовить деталь с равномерно распределенными показателями механических характеристик по всей ее высоте. В тоже время, отсутствие промежуточного отжига не способствует восстановлению пластичности полуфабриката между операциями, показанными на рис. 6.9, *nos. 5 и nos. 6*. Более того, при отсутствии промежуточного отжига происходит деформационное старение полуфабриката, если промежуток времени между операциями, показанными на рис. 6.9, *nos. 5 и nos. 6*, является существенным. Поэтому заключительные операции технологического процесса должны выполняться в непрерывной последовательности.

На основании опыта разработчиков технологического процесса и ориентируясь на данные в табл. 55 выбраны следующие величины деформации. При вытяжке с утонением стенки (между *поз. 4 и поз. 5* на рис. 6.9)  $\varepsilon_s = 15\%$  при  $\varepsilon_D = 10\%$ . При выдавливании (между поз. 5 и поз. 6 на рис. 6.9)  $\varepsilon_s = 30\%$  при  $\varepsilon_D = 5\%$ . Указанные величины деформаций позволяют определить соответствующие размеры полуфабрикатов. Расчеты проводятся в последовательности переходов от окончательной детали к исходной заготовке.

При выдавливании

$$\begin{split} & \epsilon_s = 0,30 = (S_0 - 2,0) \ / \ S_0 = 1 - 2,0 \ / \ S_0; \ S_0 = 2,0 \ / \ (1 - 0,3) = 2,86 \ \text{mm}; \\ & \epsilon_p = 0,05 = (D_0 - 45) \ / \ D_0 = 1 - 45 \ / \ D_0; \ D_0 = 45 \ / \ (1 - 0,05) = 47,4 \ \text{mm}. \end{split}$$

При вытяжке с утонением стенки

$$\varepsilon_s = 0,15 = (S_0 - 2,45) / S_0 = 1 - 2,45 / S_0; S_0 = 2,45 / (1 - 0,15) = 2,88 \text{ MM};$$
  
 $\varepsilon_D = 0,10 = (D_0 - 43) / D_0 = 1 - 43 / D_0; D_0 = 43 / (1 - 0,10) = 47,8 \text{ MM}.$ 

Усреднением данных, полученных при выдавливании и при вытяжке, определены размеры полуфабриката, показанного на рис. 6.9, *поз.* 4. При выдавливании  $D_0 = 47,4$  мм, при вытяжке  $D_0 = 47,8$  мм. Средняя величина  $D_0 = 47,6$  мм задана на рис. 6.9, *поз.* 4. При выдавливании  $S_0 = 2,86$  мм, при вытяжке  $S_0 = 2,88$  мм. Средняя величина  $S_0 = 2,87$  мм задана на рис. 6.9, *поз.* 4.

Площадь поперечного сечения полуфабриката, показанного на рис. 6.9, *поз.* 4, составляет  $F = 403 \text{ мм}^2$ . Площадь поперечного сечения заготовки  $F_0 = 2827 \text{ мм}^2$ . Относительное уменьшение площади поперечного сечения составляет  $\varepsilon_F = (2827 - 403) / 2827 = 85\%$ . Соответственно,  $e_F = \ln(2827 / 403) = 195\%$ .

Обращение к данным в табл. 55 показывает, что приведенный на рис. 6.9, *поз. 4* полуфабрикат нельзя изготовить за одну операцию закрытой прошивки из исходной заготовки, показанной на рис. 6.9, *поз. 1*. Необходимы две операции: закрытой прошивки и выдавливания. Между этими операциями, руководствуясь примерно одинаковой для них удельной силой на пуансоне, целесообразно общую величину истинной деформации разделить на  $e_F = 67\%$  для закрытой прошивки и  $e_F = 128\%$  для выдавливания. Разделение именно таким образом аргументировано выше, на стр. 295.

Поскольку при закрытой прошивке  $e_F = \ln (F_0 / F_1) = 67\%$ , площадь поперечного сечения трубной части показанного на рис. 6.9, *поз.* 2 полуфабриката  $F_1 = 1442$  мм<sup>2</sup>, откуда  $D_1 = 60$  мм;  $d_1 = 42$  мм. Тогда  $e_F = (F_0 - F_1) / F_0 = [60^2 - (60^2 - 42^2)] / 60^2 = 49\%$ . При выдавливании (между *поз.* 2 и *поз.* 3 на рис. 6.9)  $e_F = \ln (F_1 / F_2) = 128\%$ ,  $F_2 = 403$  мм<sup>2</sup>,  $F_1 = 1442$  мм<sup>2</sup>.

Тогда  $\varepsilon_s = (S_1 - S_2) / \tilde{S}_1 = (9,0 - 2,87) / 9,0 = 68\%; \varepsilon_D = (D_1 - D_2) / D_1 = (60 - 47,6) / 60 = 20,7\%.$  Согласно данным в табл. 55 эти деформации являются допустимыми.

### 6.4. Изготовление крупногабаритных порошковых стаканов на прессе для выдавливания с активно направленными напряжениями контактного трения

Обладая созданным оборудованием и развивая метод XOШ порошковых деталей типа стакана с активно направленными напряжениями контактного трения, авторы данной монографии, как было изложено в разделе 4, разработали два технологических варианта производства таких деталей. Основное отличие в этих вариантах заключается в последовательности проведения операций прессовой обработки порошковой заготовки и ее спекания.

Заметим, что в п. 1.4 отмечалось, что при производстве деталей из железного порошка можно применить ХОШ, используя формованную из порошка и спеченную заготовку простой формы, как обычную компактную заготовку, отрезанную от прутка. Однако при этом имеется ряд особенностей, связанных с тем, что заготовка из порошка, формуемая по традиционным для порошковой металлургии схемам на универсальном прессе, имеет остаточную пористость величиной 15 ... 18% по сравнению с компактной заготовкой. Причина остаточной пористости также описана в п. 1.4. На этапе спекания формованной заготовки пористость практически не меняется.

Первый из вариантов заключается в формовании на универсальном прессе цилиндрических заготовок из порошковой шихты, их спекании в среде водорода и ХОШ закрытой прошивкой из спеченных заготовок деталей типа стаканов, выполняемой на специализированном прессе. На начальном этапе прошивки увеличивают сопротивление истечению материала в трубную часть изделия. Для этого принудительно перемещают матрицу *1* со скоростью  $v_{\rm M}$  и создают по всей поверхности контакта заготовки с матрицей напряжения контактного трения  $\tau_{\rm a}$  (рис. 4.14, слева) в направлении, противоположном истечению материала деформируемой заготовки 2 в стенку стакана. На втором этапе создают напряжения контактного трения  $\tau_a$  (рис. 4.14, справа), способствующие деформированию заготовки 2 и разгружающие пуансон 3. Недостатком описанной технологии является наличие на начальном этапе технологического процесса, предшествующем спеканию, формованной по традиционной схеме на универсальном прессе порошковой заготовки, имеющей большую остаточную пористость. Такая заготовка является очень непрочной и требует бережного ручного обращения с ней. Также наличие большой остаточной пористости требует проведения спекания формованной по традиционной схеме заготовки в печи с созданием среды водорода. Спекание сформованных заготовок производится в методических печах с водородной средой при температуре 1150 °C в течение 1,5 ч. Водород восстанавливает оксидные пленки, образующиеся на поверхности частиц порошка. Однако водородная среда является взрывоопасной.

Второй вариант заключается в создании благодаря действию активно направленных напряжений контактного трения интенсивных сдвигов в объеме уплотняемого порошка и создании высокоплотной детали на этапе, предшествующем ее спеканию (рис. 4.19). Только после этого производится спекание детали. Этот вариант технологии осуществляется с применением тех же специализированных прессов, что и первый.

Конструкция и работа специализированного пресса была объяснена выше по тексту по его схеме, приведенной на рис. 5.32. На рис. 4.21 приведена заготовка, сформованная на прессе силой 1,6 МН (см. рис. 5.33) с применением показанных на рис. 4.19 схем. Эта заготовка имеет плотность, составляющую 92% от теоретической плотности железа. Такая плотность позволила зажать сформованную, но не спеченную заготовку, в тисках станка и фрезеровать ее до диаметрального продольного сечения. Затем выполнить шлиф на поверхности этого сечения и провести исследование структуры на этапе, предшествующем спеканию.

В данном пункте рассмотрена возможность объединения в одном технологическом процессе обоих указанных вариантов технологии. Активно направленные напряжения контактного трения для создания интенсивных сдвигов в уплотняемом порошке применяются на этапе уплотнения цилиндрической заготовки до ее спекания. В результате изготавливается высокоплотная заготовка, для которой возможно применение упрощенных условий спекания. Затем проводятся спекание и охлаждение заготовок, после чего осуществляется соответствующее первому варианту технологии холодное выдавливание деталей типа стаканов с активно направленными напряжениями контактного трения заготовки по матрице.

Техническая характеристика специализированного пресса, конструкция которого аналогична конструкции, показанной на рис. 5.33, но номинальная сила существенно больше, заводская модель РПГ-37 которого была изготовлена по чертежам, выполненным под руководством авторов данной монографии в ОАО «Тяжрессмаш» (г. Рязань), приведена в табл. 56.

Номи- нальное давление рабочей жидкости, МПа	Номи- нальная сила главного гидроци- линдра, МН	Номиналы гидроцил привода м МН Ход вверх	ная сила пиндра атрицы, I Ход вниз	Рабочий ход главного гидроци- линдра, мм	Рабочий ход гидроци- линдра привода матрицы, мм	Устано- вочная высота матрицы, мм
320	6,3	1,0	1,6	280	600	360

Табл. 56. Техническая характеристика специализированного пресса

На прессе модели РПГ-37 возможно формование заготовки, аналогичной по форме заготовке, приведенной на рис. 4.21, но имеющей наибольший диаметр, равный 96 мм, а наименьший – 86 мм. Рассчитанная масса порошка при достижении плотности детали, равной 92%, составляет 4 кг 790 г.

Для формования заготовки с указанными размерами выполняется последовательность операций, приведенная на рис. 6.10.



Рис. 6.10. Последовательность операций, выполняемых при формовании высокоплотной заготовки на прессе модели РПГ-37: *1* – пресс-штемпель, *2* – сформованная заготовка, *3* – пресс-шайба, *4* – матрица, *5* – пуансон

В начале пресс-штемпель *1* и матрица *4* отводятся в нижнее крайнее положение (*nos. a* на рис. 6.10). В полость матрицы засыпается порошок. Засыпка производится до уровня верхнего торца (зеркала) матрицы, что позволяет механизировать засыпку с использованием движущейся как шибер

засыпной кассеты. Кассета входит внутрь траверсы 4 (см. схему пресса на рис. 5.32) через одно из двух встречно расположенных окон в траверсе 4. В кассету шихта поступает по гибкому шлангу из бункера, установленного вверху станины пресса.

На следующем этапе (*nos.* б) матрица 4 от своего привода (см. схему пресса на рис. 5.32) поднимается в направлении неподвижного пуансона 5. Одновременно от своего привода поднимается пресс-штемпель 1. Скорость подъема матрицы несколько больше скорости подъема пресс-штемпеля, что обеспечивается дросселем, показанным на схеме пресса (рис. 5.32, *nos.* 9) и регулирующим скорость подъема матрицы. Опережающая скорость подъема матрицы позволяет освободить в полости матрицы пространство, в которое устанавливается пресс-шайба 3 (рис. 6.10). Пресс-шайба изготавливается из той же инструментальной стали, что и пуансон, и закаливается на такую же твердость. Канавка на верхнем торце пресс-шайбы 3 притерта по поверхность канавки на верхнем торце пресс-шайбы 3 при продолжении движения пресс-штемпеля 1 и матрицы 4 с указанным выше соотношением их скоростей производится уплотнение находящегося в матрице порошка, как это показано в поз. в на рис. 6.10.

После достижения заданной силы, рассчитанной из условия создания на нижнем торце заготовки 3 удельной силы, равной 800 МПа, реле давления останавливает пресс-штемпель l, и матрица перемещается под действием своего гидропривода вниз, как это показано в позиции e на рис. 6.10. На этом формование заготовки заканчивается, элементы пресса отводятся в положения, показанные в *поз.* d на рис. 6.10, и сформованная заготовка 2 вместе с пресс-шайбой 3 удаляется из рабочего пространства пресса.

С целью проверки отсутствия перегрузки пуансона 5 при создании на нижнем торце заготовки 2 удельной силы, равной 800 МПа, рассчитана сила, развиваемая прессом, при этом учтено, что нижний торец заготовки 2 имеет диаметр 96 мм. Эта сила составила 5,79 МН. Поскольку несколько ниже по тексту диаметр пуансона 5 будет рассчитан из условия обеспечения на нем удельной силы, равной 2500 МПа при силе пресса 6,3 МН, проверка показала, что пуансон 5 не будет перегружен при указанной удельной силе на нижнем торце заготовки 2.

Сформованная заготовка передается на операцию спекания. Поскольку формование проводилось в условиях интенсивных сдвигов между частицами порошка и это способствовало разрушению оксидных пленок на их поверхностях, открывается возможность использовать для спекания печь не с взрывоопасной водородной средой, а печь с инертным газом – азотом или аргоном.

В тоже время, спекание целесообразно производить в специализированной методической печи, имеющей 3 зоны: зону для выжига пластификатора, зону, в которой происходит непосредственно спекание материала в течение 1,5 ч при температуре 1000 °C, и зону охлаждения заготовок до температуры 600 °C. Дальнейшее охлаждение заготовок производится на воздухе. Перед последующей штамповкой на остывшие заготовки наносится паста дисульфида молибдена, выполняющая роль смазочного материала. Затем из заготовок холодным выдавливанием изготавливают детали типа стаканов. Выдавливание осуществляется на том же прессе, на котором производилось формование заготовок, в том же штамповом инструменте.

Последовательность деформирующих заготовку операций приведена на рис. 6.11.



Рис. 6.11. Последовательность операций, выполняемых при выдавливании детали типа стакана из сформованной и спеченной порошковой заготовки на прессе модели РПГ-37: *1* – пресс-штемпель, *2* – выдавленная деталь, *3* – съемник детали с пуансона, *4* – матрица, *5* – пуансон

В начале (рис. 6.11, поз. а) пресс-штемпель *1* отведен в нижнее свое положение, а матрица *4* – в положение, при котором загружаемая со стороны нижнего ее торца и продвигаемая вверх спеченная заготовка упрется в рабочий торец пуансона *5*. На следующем этапе поднимается пресс-штемпель и фиксирует положение заготовки, показанное на рис. 6.11 в *поз. б.* При дальнейшем движении вверх пресс-штемпеля создается деформирующая заготовку сила, и выполняется выдавливание детали *2*.

Исходя из условия создания на пуансоне 5 удельной силы, не превышающей 2500 МПа, рассчитан диаметр полости детали типа стакана, которую можно выдавить на прессе РПГ-37. Для этого найдено частное от деления

развиваемой прессом силы в 6,3 МН на величину удельной силы, действующей на пуансон и равной 2500 МПа. Таким образом, определена площадь поперечного сечения калибрующего пояска пуансона. Такую площадь имеет пуансон с диаметром калибрующего пояска, равным 56 мм.

Как будет рекомендовано ниже по тексту, изготавливаемая на прессе деталь типа стакана является заготовкой для последующей обработки давлением. Поэтому внешний диаметр изготавливаемой на прессе детали целесообразно выбрать из условия наименьшей величины удельной силы, действующей на пуансон при ее выдавливании. В п. 2.2 на рис. 2.4 приведены графики зависимости относительной удельной силы выдавливания от соотношения радиусов внешней и внутренней поверхностей изготавливаемой детали типа стакана. Из этих графиков следует, что наименьшее значение удельная сила имеет, если отношение радиуса внешней поверхности к радиусу внутренней поверхности составляет примерно 1,5. Из этого условия определено, что диаметр меньшего по площади поперечного сечения полости матрицы равен 86 мм (см. рис. 6.10, *поз. д*). Диаметр большего по площади поперечного сечения участка полости матрицы определен из аналогии по отношению к диаметрам матрицы, применявшейся в эксперименте, схема которого показана на рис. 4.19, а фотография изготовленной в эксперименте заготовки приведена на рис. 4.21. Получено, что искомый диаметр равен 96 мм.

Этап снятия изготовленной на прессе детали показан на рис. 6.11, *поз. г.* Для снятия используется закаленная на среднюю прочность пластина *3*, имеющая достаточную площадь в плане и неглубокую в направление к середине ее плоской поверхности прорезь. Ширина прорези незначительно превышает диаметр калибрующего пояска пуансона. Эти требования вытекают из условия, обеспечивающего достаточную величину момента сопротивления пластины *3* изгибу.

Поскольку матрица имеет два участка разного диаметра, осуществляется штамповка детали закрытой прошивкой с использованием не только активно направленных сил контактного трения, но также и с использованием непрерывно открывающейся компенсационной полости, как это было показано на схеме, приведенной на рис. 4.20.

Последующая обработка давлением детали, изготовленной на специализированном прессе, может быть проведена на трехвалковых ротационных машинах [64]. При этом стенка изготавливаемой детали может быть существенно утонена, также стенка может иметь утолщения на внешней поверхности детали в виде окружных поясков.

В статье [65] описана технология производства показанного на рис. 4.6 корпуса гидроцилиндра из железного порошка. Там же приведены преимущества порошкового корпуса по сравнению со стальным.

Исследование обжима горловины гидроцилиндра, направленное на обеспечение требуемой ее формы, в указанной статье было приведено в достаточном объеме. В данном разделе оценены возможности изготовления крупногабаритных порошковых деталей типа стакана на прессе для выдавливания с активно направленными напряжениями контактного трения. Продемонстрирована возможность изготовления заготовки корпусной детали, имеющей высокую плотность. Такая плотность требуется для обеспечения заданного ресурса работы гидроцилиндра.

Таким образом, специалисты в области машин и технологии обработки металлов давлением успешно сотрудничают со специалистами в области порошковой металлургии, разрабатывая новые способы изготовления деталей из порошков на железной основе. Эти способы они реализуют на создаваемом по их чертежам специализированном прессовом оборудовании.

# 6.5. Повышение целесообразности холодной объемной штамповки деталей из железных порошков в сопоставлении с деталями из малоуглеродистых сталей

Указанное в заглавии данного пункта сопоставление проведено для XOШ осесимметричных деталей с полостями большой глубины, расположенными вдоль оси деталей. Такие детали из железного порошка, изготовленные авторами данной монографии с использованием XOШ, в качестве примера можно увидеть на рис. 4.16.

Порошковые материалы всегда дороже литых (компактных) материалов с аналогичным химическим составом. В машиностроении их используют потому, что порошковые изделия могут иметь специальные служебные свойства.

В данной монографии рассматриваются детали, изготовленные XOIII, которая имеет преимущества по сравнению с другими технологическими процессами. Эти преимущества были изложены в п. 1.1 данной монографии. В тоже время, как уже было отмечено в п.1.1, изготовленные XOIII детали из компактных заготовок обладают существенной анизотропией свойств. Изготовление деталей рассматриваемой формы характеризуется продолжительным течением металла заготовки в формируемую стенку детали. Поэтому анизотропия механических свойств изделия рассматриваемой формы из металлопроката выражена в большей степени по сравнению с XOIII плоских деталей.

Чтобы уменьшить анизотропию свойств, по сравнению с деталями, изготавливаемыми из металлопроката, применяют ХОШ деталей из металлических порошков. После штамповки порошковые заготовки подвергают спеканию в печах с защищающей от окисления газовой средой. Химическую однородность отдельных частиц порошка, их размеры и кристаллическое строение обеспечить значительно проще, чем при изготовлении деталей из металлопроката.



Рис. 6.12. Схема уплотнения засыпанного порошка в закрытой матрице

Приготовление порошковой шихты (далее порошка) было рассмотрено выше, в частности, в п. 1.4.

Рассматриваемая в данной монографии форма деталей при изготовлении их из порошка предъявляет особенные требования к прессам. Причина этого пояснена с помощью рис. 6.12.

При формовании образцов цилиндрической формы из порошков на железной основе порошок засыпают в матрицу и производят одностороннее или двухстороннее его уплотнение пуансонами, имеющими диаметр, равный диаметру матрицы. При этом, исходя из соотношений

засыпной плотности порошка и плотности формованного образца, получают высоту образца l примерно в 2,5 раза меньшую высоты  $l_0$ , с которой засыпанный порошок размещается в матрице. Поэтому прессы для формования порошковых изделий должны иметь большие хода исполнительных органов



Рис. 6.13. Пресс-форма для формования заготовки стакана

(ползунов) и большие расстояния между рабочим столом и ползуном (большие закрытые высоты).

Выпускаемые порошковые пресс-автоматы имеют небольшие величины ходов деформирующих порошок инструментов и высоты засыпных камер в матрицах [1, 32]. Автоматами они названы потому, что снабжены бункерными и подающими устройствами для засыпки порошка в пресс-формы.

Пример пресс-формы для формования заготовки стакана к пресс-автомату приведен на рис. 6.13. Приведенная на рисунке пресс-форма сконструирована на основе концепции о том, что во всех элементах изготавливаемой детали порошок должен быть уплотнен с одинаковыми изменениями между его исходной (засыпной) плотностью и плотностью этого элемента после сжатия порошка.

Пресс-форма, показанная на рис. 6.13, состоит из пресс-штемпеля *1*, матрицы 2, пуансона 3 и оправки 4. После запол-

нения порошком полости матрицы, ограниченной оправкой и пуансоном, пресс-штемпель *l* опускается, уплотняя порошок, одновременно опускаются матрица *2* и оправка *4*, обеспечивая схему двухстороннего формования и получение равноплотной формованной заготовки. Оправка *4* опускается до тех пор, пока шток гидроцилиндра привода оправки не достигнет регулируемого упора, смонтированного в прессе, после чего дно и стенки формуемой детали дополнительно уплотняются при неподвижной оправке.

Для расчета размерных цепей рабочих элементов пресс-формы используют следующие параметры:  $H_{\rm II}$  – ход ползуна пресса,  $H_{\rm B}$  – ход выталкивателя пресса,  $H_{\rm I}$  – расстояние от нижнего торца верхней плиты пресс-формы до верхнего торца (зеркала) матрицы,  $H_{\rm 2}$  – максимальное расстояние от зеркала матрицы до нижней плоскости плиты опоры пуансона,  $H_{\rm 3}$  – максимальное расстояние от торца штока цилиндра перемещения оправки до нижней плоскости плиты опоры пуансона,  $H_{\rm 5}$  – толщина набора из плиты опоры пуансона и прокладки,  $h_{\rm H1}$  – насыпная высота порошка для формования стенки детали,  $h_{\rm H2}$  – насыпная высота порошка для формования донной части детали,  $h_{\rm H2}$  – высота детали,  $h_{\rm 1}$  – толщина дна детали.

Длину  $H_6$  пресс-штемпеля *1* и длину  $H_7$  пуансона *3* определяют из следующих соотношений:

$$H_1 + h_{\text{H1}} = H_{\Pi} + H_4 + H_6 + h$$
, откуда  $H_6 = H_1 + h_{\text{H1}} - (H_{\Pi} + H_4 + h), H_7 = H_2 - -(H_{\text{B}} + H_5).$ 

В рассматриваемой пресс-форме оправка 4 опускается до упора на величину хода, определяемую по соотношению  $S = (h_{H1} - h_{H2}) - (h - h_1)$ .

Длину оправки рассчитывают по формуле

$$H_8 = (H_2 + H_3) - (H_B - H_1) - S.$$

С использованием приведенных данных, составлена методика расчета, позволяющая избежать ошибок при проектировании элементов пресс-формы и сокращающая этап технологической подготовки производства.

На рис. 6.13 видно, что приведенная конструкция пресс-формы предназначена для формования невысоких деталей типа стакана с совсем неглубокой полостью. Если из размерного ряда выбирать такой пресс-автомат для формования глубокого стакана, то, руководствуясь требованиями к величинам рабочих ходов его исполнительных элементов и размерам засыпных камер пресс-формы, придется выбрать пресс-автомат с весьма большим запасом по создаваемой им силе по сравнению с силой, необходимой для формования порошковой заготовки детали. Эксплуатация такого пресса будет происходить при низком КПД.

Отсутствие прессов, необходимых для производства осесимметричных деталей с полостями, у которых глубина в несколько раз превышает диаметр, свидетельствует о том, что специалисты в области порошковой металлургии не разрабатывали процессы производства таких деталей. Указанная выше концепция о том, что во всех элементах изготавливаемой детали порошок должен быть одинаково уплотнен, имеет существенный недостаток. Сформованные на пресс-автоматах полуфабрикаты деталей из порошков на железной основе имеют остаточную пористость величиной 13...15%. Невозможность уменьшения остаточной пористости в деталях путем увеличения уплотняющей порошок силы объяснена выше в п. 1.4 данной монографии. После формования полуфабрикаты деталей, имеющие указанную пористость, удаляются с зеркала матрицы оператором вручную и также вручную укладываются в поддоны. Поддоны загружают в печь для спекания деталей.

Детали из железных порошков спекают в методических печах, с созданием восстановительной газовой среды, в качестве которой используют водород или диссоциированный аммиак. В печах предусмотрены 3 температурные зоны. В первой зоне, имеющей температуру 500...600 °C, производится выжиг стеарата цинка из спекаемых полуфабрикатов. Во второй зоне производится непосредственно спекание полуфабрикатов при указанных ниже температурах, в третьей зоне спеченную деталь охлаждают в защитной газовой среде до температуры примерно 600 °C. Дальнейшее охлаждение производится на воздухе. После спекания деталь представляет собой твердое тело, имеющее остаточную пористость. Спекание деталей из железных порошков производят при температурах 1050...1150 °C.

При производстве деталей рассматриваемого в данном пункте монографии типа из железного порошка можно применить ХОШ, используя сформованную и спеченную не имеющую полости заготовку цилиндрической формы аналогично обычной заготовке, отрезанной от прутка.

Заметим, что если исходная заготовка изготовлена из легированной порошковой стали, то при ХОШ возникают очень большие удельные силы, действующие на выдавливающий полость пуансон. При этом пуансон может не удовлетворять предъявляемому к нему требованию по сопротивлению усталости при штамповке, а в предельном случае – сразу разрушиться. Эта проблема аналогична проблеме, имеющей место при ХОШ стаканов из компактных легированных сталей.

Целью описываемого здесь исследования является рассмотрение применения технологии производства ХОШ деталей типа высоких стаканов, изготовленных из порошков на железной основе, имеющих глубокие осевые полости и обладающие плотностью, близкой к 100%. При этом использование порошковых пресс- автоматов обязательным не является. Они могут, при их наличии, быть применены на этапе формования исходных цилиндрических порошковых заготовок. В данном пункте монографии впервые приведены результаты сравнительного исследования прочностей изготовленных с применением ХОШ стаканов из прутковых заготовок из малоуглеродистых сталей и из заготовок, сформованных и спеченных из железного порошка. С целью увеличения сопротивления усталости выдавливающих полости в деталях пуансонов и повышения плотности изготавливаемых порошковых деталей, для ХОШ применены созданные по чертежам авторов и описанные в п.5.4 данной монографии специализированные прессы.

Действующие на поверхности заготовки активно направленные напряжения контактного трения при штамповке на таких прессах позволяют частично разгрузить пуансон, выдавливающий полость в заготовке, и повысить его сопротивление усталости. Созданное специализированное оборудование авторы применяют как при производстве деталей из заготовок из малоуглеродистых сталей, так и деталей из сформованных и спеченных заготовок из порошков на железной основе.

При изготовлении высоких исходных порошковых заготовок для последующей штамповки полых деталей схема одностороннего формования, приведенная на рис. 6.12, применяется редко. Это связано с существенной неравномерностью плотности заготовки, формованной перемещением относительно матрицы только верхнего пуансона. Более распространена схема двухстороннего уплотнения, при котором одновременно с формующим порошок пуансоном, движущимся, как правило, сверху, в том же направлении перемещается матрица. Нижний пуансон, по отношению к которому перемещается матрица, неподвижен. При двухстороннем формовании скорость перемещения матрицы в том же направлении, как у верхнего пуансона, вдвое меньше скорости этого пуансона.

В условиях использования универсальных гидравлических прессов с верхним расположением ползуна при выполнении двухстороннего формования заготовок матрицу удерживают в состоянии «на весу» на этапе засыпки в нее порошковой шихты заранее отмеренного объема. Удержание матрицы в указанном состоянии может быть осуществлено, например, путем применения устройства, показанного на рис. 4.2, при соблюдении приведенных там комментариев к этому рисунку.

Исходные для XOШ порошковые заготовки, изготовленные с помощью двухстороннего формования, спекают в печах в среде восстановительных или хотя бы инертных газов. Спеченные заготовки имеют остаточную пористость величиной 13...15%.

В связи с необходимостью исключения этой остаточной пористости разработанная авторами данной монографии схема ХОШ выдавливанием с активно направленными напряжениями контактного трения для заготовки, сформованной и спеченной из порошка на железной основе (рис. 4.14), отличается от схемы ХОШ выдавливанием с активно направленными напряжениями контактного трения, применяемой для заготовки из малоуглеродистой стали.

Для спеченной порошковой заготовки применяют два этапа перемещения матрицы в процессе выдавливания, и используют активно направленные напряжения контактного трения между матрицей и заготовкой сначала для повышения плотности выдавливаемой стенки детали, а затем для разгрузки выдавливающего полость в детали пуансона. При выдавливании заготовки из компактной стали используют только второй из указанных этапов.

Из стали 20 детали штамповали без предварительного отжига заготовок. Значения пределов прочности таких деталей, изготовленных холодным выдавливанием, приведены в п. 2.1 данной монографии. При степени деформации стальной заготовки, равной 44,5%,  $\sigma_{\rm B}$  = 853 МПа, а при степени деформации 56,3%,  $\sigma_{\rm D}$  = 917 МПа.

Сопоставление указанных пределов прочности стальных деталей проведено с пределом прочности деталей из порошка ПЖВ2.160.28. Поскольку пределы прочности порошковых деталей зависят от их плотностей, данные по плотностям деталей из рассматриваемого порошка и их пределах прочности, взятые из п. 4.3 данной монографии, сведены в табл. 57 (две верхние строки).

В результате корреляционного анализа [21] определена связь между прочностью  $\sigma_{\text{Вэксп}}$  образца и его плотностью  $\gamma$ . Рассчитанная величина коэффициента парной корреляции r = 0,924. Такая величина коэффициента парной корреляции подтверждает, что корреляционная связь между сопоставляемыми величинами значима. Более того, эта связь является сильной, что подтверждается превышением расчетного значения коэффициента над табличным значением, взятым даже при доверительной вероятности Р большей, чем 99%.

γ, г/см <sup>3</sup>	5,7	6,4	7,25	7,05	6,65	6,75	7,51	6,47
$σ_{\rm B}^{ m эксп}$ , ΜΠα	62	120	218	190	199	202,4	257,4	186,8
$\sigma_{\rm B}^{\rm pacч}$ , МПа	77,5	147,3	232,1	212,1	172,2	182,2	258	154,3

Табл. 57. Плотности и прочности деталей, изготовленных из порошка ПЖВ2.160.28

По методике, приведенной в [21], получена зависимость, связывающая прочность формованного и спеченного порошкового образца с его плотностью:

$$\sigma_{\rm B} = 99,74 \ \gamma - 491,04. \tag{184}$$

Рассчитанные с применением зависимости (184) значения предела прочности  $\sigma_{\rm B}^{\rm pac4}$  приведены в нижней строке табл. 57. Из таблицы видно, что значения  $\sigma_{\rm B}^{\rm pac4}$  и  $\sigma_{\rm B}^{\rm pac4}$  несколько различаются между собой. Это связано с тем, что данная формула характеризует линейную зависимость, а на практике зависимость нелинейная. Однако задачей данного исследования является общая оценка величины предела прочности, достигаемого при изготовлении деталей рассматриваемого типа из железного порошка. Для такой оценки использование зависимости (184) является приемлемым.

Сравнение величин пределов прочности деталей, изготовленных из стали 20 и из железного порошка ПЖВ2.160.28, показывает, что у стальных деталей предел прочности превышает этот же показатель у деталей, изготовленных из железного порошка. То, что сталь 20 содержит массовую долю 0,17...0,24% углерода, а порошок ПЖВ2.160.28 ее не содержит, не меняет принципиально результаты проведенного сравнения, поскольку установленное различие пределов прочности существенное.

В тоже время, как было отмечено выше, детали, штампованные из отрезанных от прутка компактных заготовок, обладают большой анизотропией свойств. Они имеют существенную полосчатость структуры, и при большой прочности на растяжение вдоль их оси их прочность в поперечном направлении существенно меньше.

При изготовлении деталей типа стаканов XOШ из порошковых заготовок, достигаемая их прочность, численно указанная выше, одинакова в разных направлениях, т.е. изотропна. Это особенно важно, когда задача стоит в получении изделия со специальными служебными свойствами.

На рис. 6.14 [1] приведены данные о распределении плотностей в стаканах, изготовленных холодным выдавливанием из спеченных порошковых заготовок по схеме, приведенной на рис. 4.14. Показано распределение плотности в стаканах, изготовленных из порошка ПЖВ2.160.28 при различных направлениях перемещения матрицы. Заготовки были сформованы при двухстороннем уплотнении порошка по традиционной схеме и спечены. Спекание проводили в среде водорода при температуре 1150 °C в течение 1,5 ч. Перед ХОШ заготовки смазывали пастой дисульфида молибдена.

На рис. 6.14, слева, показаны результаты выдавливания заготовок при отношении диаметра матрицы к диаметру пуансона R = 1,5, а справа – при R = 1,25. Относительная скорость перемещения матрицы  $v_{\rm M}$  определяется как частное от деления скорости (с учетом направления) перемещения матрицы на скорость перемещения продвигающего заготовку пуансона. При положительном значении  $v_{\rm M}$  направления перемещения матрицы и пуансона совпадают между собой (рис. 6.14, справа). При отрицательном значении vм направление перемещения матрицы положительном значения матрицы противоположно направлению перемещения продвигающего заготовку правлению значении матрицы и пуансона совпадают между собой (рис. 6.14, справа).



**Рис. 6.14.** Распределение плотности в г/ см<sup>3</sup> в изделиях при R = 1,5 (слева) и R = 1,25 (справа) в зависимости от направления перемещения матрицы

Из рассмотрения рис. 6.14 следует, что направление напряжений контактного трения между матрицей и деформируемой заготовкой существенно влияет на распределение плотности в изделиях. Неравномерность распределения плотности при скорости матрицы  $v_{\rm M} = -1$  в 2,5 раза меньше, чем при скорости  $v_{\rm M} = 1$  (соответственно, 1,8 и 4,9%). Помимо снижения неравномерности распределения плотности, средняя плотность изготавливаемых деталей типа стаканов повышается на 3...6% по сравнению с выдавливанием стаканов из спеченных порошковых заготовок по традиционной схеме.

Подстановкой приведенных на рис. 6.14 значений плотностей в зависимость (184) определено, что прочности в разных точках сечений показанных на рисунках деталей, изготовленных при использовании рационально направленных напряжений контактного трения в соответствии со способом, показанном на рис. 4.14, находятся в диапазоне от 252 МПа до 300 МПа.

Пределы прочности порошковых деталей существенно зависят от их плотностей. Для достижения наибольшей величины прочности порошковых деталей разработан технологический процесс их изготовления ХОШ с активно направленными напряжениями контактного трения, позволивший изготовить детали с плотностью, достигающей 99% от теоретической плотности железа.

Сравнение величин пределов прочности деталей, изготовленных из стали 20 и из железного порошка ПЖВ2.160.28, показывает, что у стальных деталей предел прочности превышает этот же показатель у деталей, изготовленных из железного порошка даже при плотности последних, близкой с 100% от теоретической плотности железа. Однако стальные детали обладают существенной анизотропией своих свойств. При сравнении с деталями из порошка на железной основе рассматривали предел прочности стальных деталей, определенный в направлении продолжительного течения выдавливаемого металла в стенки глубоких стаканов. Вследствие этого, при определении предела прочности стальных деталей анизотропия их свойств проявилась наиболее существенно.

При заинтересованности потребителей деталей типа глубоких стаканов, обладающих изотропными свойствами и для этого изготавливаемых из порошков на железной основе, описанный в статье технологический процесс позволяет упростить и удешевить производство таких деталей по сравнению с технологическими процессами и прессовым оборудованием, традиционными для порошковой металлургии. При этом будет достигнуто качество изделий (их высокие плотность, прочность и низкая шероховатость поверхностей), не достигаемое специалистами в области порошковой металлургии.

# 6.6. Разработка технологического процесса выдавливания детали типа крупногабаритного стакана со сферическим дном и фланцем

Чертеж детали из алюминиевого сплава АК6, имеющей большие габаритные размеры, приведен на рис. 6.15 [67].

Одним из основных требований к таким деталям является неразрывность волокон их макроструктуры, при этом форма волокон должна совпадать с контуром полости детали. Полость штампованной поковки детали в области ее сферического дна и примыкающей к нему стенки не должна нуждаться в дополнительной обработке с целью уменьшения шероховатости ее поверхности. Изготовить поковку детали, соответствующую приведенным требованиям, возможно закрытой прошивкой ее полуфабриката из цилиндрической заготовки пуансоном, имеющим торец сферической формы, и последующим выдавливанием полуфабриката для утонения его стенки.

Также требуется, чтобы разработанный технологический процесс штамповки производился с одного нагрева заготовки, на одном гидравлическом прессе. Это необходимо, чтобы штампованная поковка и изготовленная затем из нее деталь имели структуру, однородность которой не была бы нарушена промежуточным нагревом.



Рис. 6.15. Деталь типа стакана со сферическим дном и фланцем

Для производства рассматриваемых деталей предполагается изготовление специализированного пресса, при этом в связи с крупными габаритами штампов количество позиций формоизменения заготовки ограничено допускаемыми габаритами рабочего стола пресса и конструкцией устройства перемещения этого стола при подаче каждого из штампов в рабочую позицию. Поскольку строгое требование к расположению волокон предъявляется к внутреннему контуру детали, на внешней поверхности штампованной поковки могут быть предусмотрены напуски и припуски, впоследствии удаляемые резанием. После их назначения штампуемая поковка имеет вид, приведенный на рис. 6.16, *в*. Показанную поковку целесообразно штамповать из заготовки, расположенной в матрице таким образом, чтобы волокна ее структуры совпадали по направлению с направлением движения прошивающего полость пуансона. Поковку целесообразно штамповать из заготовки, имеющей диаметр, равный диаметру фланца поковки (см. рис. 6.15), то есть 481 мм.

Объем поковки, рассчитанный на основании приведенных на рис. 6.16 ее размеров, равен  $V_n = 24520$  см<sup>3</sup>. Если штамповку производить из заготовки одного диаметра, при диаметре заготовки, равном диаметру фланца поковки, и указанном объеме заготовки ее высота составит 135 мм, т.е. заготовка будет иметь высоту, которая примерно в 2,8 раза меньше ее диаметра. При штамповке такой заготовки, как будет видно на рис. 6.17, *г*, приведенном далее, ее потребуется уложить в полость, образованную верхней плоскостью матрицы первого перехода и контейнером. При деформировании пуансоном со сферическим торцом произойдет операция вытяжки толстолистовой заготовки вместо операции ее закрытой прошивки. При этом волокнистость структуры изготовленной детали не будет соответствовать заданной в приведенном выше комментарии к чертежу детали. Для осуществления закрытой прошивки предложено использовать заготовку ступенчатой формы (рис. 6.16, *a*).



**Рис. 6.16.** Ступенчатая заготовка для закрытой прошивки и 2 перехода ее формоизменения штамповкой

Ступенчатые заготовки, показанные на рис. 6.16, a, у которых больший диаметр равен диаметру фланца поковки, предложено изготавливать холодной высадкой в закрытой матрице из исходных цилиндрических заготовок. Диаметр  $d_0$  этих исходных заготовок, равный меньшему диаметру ступенчатых заготовок, будет обоснован в данном пункте ниже, исходя из условия отсутствия трещинообразования (исчерпания ресурса пластичности мате-

риала) при высадке. Холодную штамповку высадкой заготовок, показанных на рис. 6.16, *a*, предложено производить на отдельном прессе. То, что ступенчатые заготовки будут изготавливаться высадкой из прутка меньшего диаметра, является рациональным с позиции уменьшения отходов при резке прутка. Разрезку прутка на исходные заготовки предлагается осуществлять на пилах. После разделения прутка на исходные заготовки предусмотрено экономное обтачивание заготовок перед высадкой с целью устранения имеющихся на поверхности прутка дефектов. Также это делается для обеспечения требуемых длин и диаметров заготовок и перпендикулярности торцов отрезанных заготовок по отношению к их осям.

Соответствующий указанным выше требованиям рациональный маршрут формоизменения заготовки при штамповке из нее приведенной на рис. 6.16, в поковки показан, по этапам, на рис. 6.17 [67].

Специализация пресса, предназначенного для осуществления разрабатываемого технологического процесса, заключается во введении в его конструкцию передвижного стола и дополнительной траверсы. На передвижном столе (см. рис. 6.17, *б*), обозначенном на рис 6.17, *в* позицией *1*, установлены матрица 2 (см. рис. 6.17, *в*) первого и матрица 7 (см. рис. 6.17, *з*) второго переходов. В дополнительной траверсе пресса размещен контейнер *4* штампа.



Рис. 6.17. Переходы штамповки и соответствующие им перемещения рабочих частей пресса и штампа

### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Заготовку 3, форма которой показана на рис. 6.17, *a*, укладывают в матрицу первого перехода, см. рис. 6.17, *б*. Контейнер опускают, как показано на рис. 6.17, *г*, и он охватывает матрицу. Ползун пресса с установленным на нем пуансоном 8 (см. рис. 6.17, *з*) совершает рабочий ход. В начале деформирования заготовки ее металл заполняет сферическую полость (рис. 6.17, *д*) матрицы, затем оформляется сферическое дно детали и одновременно осуществляется закрытой прошивкой формирование стенки полуфабриката (см. рис. 6.16, *a*), имеющей большую толщину и меньшую высоту, чем у окончательной поковки. В процессе формирования стенки полуфабриката при закрытой прошивке заготовки наблюдается неравномерное заполнение пространства между пуансоном и контейнером. В нижней части формируемой стенки полуфабриката вытекший в полость между пуансоном и контейнером металл не примыкает к стенке контейнера. Однако в конце операции закрытой прошивки фланец пуансона осаживает фланцевую часть полуфабриката и оформляет заданную чертежом его форму (см. рис. 6.16, *б*).

Необходимость операции изготовления полуфабриката с меньшей глубиной полости, чем у готовой поковки, объясняется проблемой ресурса смазочного слоя на сферическом торце прошивающего полость пуансона. Выше, в п. 1.2 данной монографии было отмечено, что пуансон со сферическим торцом удерживает на своей поверхности смазку хуже, чем пуансоны с другими возможными формами торцов. В тоже время, в соответствии с изложенным выше требованием, для обеспечения качества поверхности полости детали не должно быть дополнительных ее обработок. Также нежелательно увеличение числа операций, которое имело бы место при закрытой прошивке полости поковки пуансоном с другой формой торца и последующем калибровании дна со стороны полости сферическим пуансоном. При этом не было бы обеспечено непрерывное течение металла и формирование неразрывной структуры волокон вдоль внутренней сферической поверхности поковки.

После штамповки полуфабриката, имеющего дно, соответствующее готовой поковке, а стенку – укороченную и утолщенную по сравнению с поковкой, контейнер и пуансон, как показано на рис. 6.17,  $\partial$ , отводят вверх, при этом благодаря трению на поверхности контейнера полуфабрикат остается на пуансоне. На рис. 6.17, *е* и 6.17, *ж* показано, что после подъема контейнера и пуансона стол перемещают, и матрицу 2, в которой производилась закрытая прошивка заготовки, заменяют матрицей 7 для выдавливания. После показанной на рис. 6.17, *з* штамповки выдавливанием заданной поковки 5 пуансон и контейнер отводят вверх, и съемник 6 снимает поковку 5 с пуансона. Изготовленная поковка приведена на рис. 6.17, *и*.

При проектировании специализированного пресса для реализации показанного на рис. 6.17 процесса деформирования заготовок необходимо знание величин деформирующих сил операций закрытой прошивки и выдавливания. Для их определения проведено описанное ниже исследование. Целью описанного ниже исследования является определение рациональной формы ступенчатых заготовок, имеющих участки двух диаметров, у которых больший диаметр равен диаметру фланца поковки. Ступенчатые заготовки предполагается изготавливать холодной высадкой из отрезанных пилой от прутка и обточенных на станке цилиндрических заготовок, диаметр которых равен меньшему диаметру ступенчатой заготовки. Также определение диаметра исходной цилиндрической заготовки, позволяющей произвести ее холодную высадку без потери устойчивости и разрушения при высадке. Определение силы холодной высадки ступенчатой заготовки для выбора пресса, выполняющего высадку. Также определение силы каждого из двух переходов штамповки поковки стакана со сферическим дном и

фланцем, что необходимо для задания величины силы, которой должен обладать разрабатываемый специализированный пресс.

Для определения рациональных размеров h,  $h_1$  и  $d_0$  ступенчатой заготовки (см. рис. 6.18, a), исходя из знания объема поковки, проведено следующее исследование. Оценивается возможность холодной высадки без разрушения на исходной заготовке, имеющей диаметр  $d_0$ , торцового участка, имеющего диаметр d = 481 мм.

В опасной точке А заготовки, расположенной на середине высоты высаживаемого участка (рис. 6.18) относительное (по отношению к напряжению текучести материала) гидростатическое давление определяется по полученной в работе [68] формуле



**Рис. 6.18.** Схема высадки фланца

$$\sigma = -0,333 - \frac{\mu h}{d}.$$
(185)

В этой формуле  $\mu$  – коэффициент контактного трения на торце высаживаемой части заготовки. Поскольку высадка производится в холодном состоянии заготовки, и технологический процесс позволяет на этапе высадки произвести смазывание торца заготовки, например, техническим животным жиром, в формуле (185) принято значение  $\mu$  = 0,1. Заметим, что при высадке в холодном состоянии и хорошей смазке торцевой поверхности заготовки у высаженной ее части бочкообразность практически не образуется.

Определение рациональных величин  $d_0$  и  $h_0$  (см. рис. 6.18), а также оценка возможности при таких  $d_0$  и  $h_0$  высадки заготовки, показанной на рис. 6.16, a, без ее разрушения, проведены следующим образом.

Для недопущения потери устойчивости заготовки при высадке на ней фланца (см. рис. 6.18) принято, что длина отрезанной от прутка и обточенной исходной цилиндрической заготовки  $H = h_0 + h_1 = 2,5 d_0$ . Тогда  $(\pi d_0^2/4) \cdot 2,5 d_0 = V_{\pi}$ . Отсюда  $d_0 = 232$  мм и H = 580 мм. Из условия укладки ступенчатой заготовки (см. рис. 6.16, *a*), имеющей диаметр  $d_0 = 232$  мм, в сферическую полость матрицы, имеющую заданный чертежом поковки диаметр (см. рис. 6.16, *в*), графически определено, что  $h_1 = 133,5$  мм. Таким образом, высадке подвергается часть исходной заготовки с размерами (см. рис. 6.18)  $d_0 = 232$  мм,  $h_0 = 580 - 133,5 = 446,5$  мм. Высаживают ступенчатую заготовку, имеющую размеры участка меньшего диаметра (см. рис. 6.16, *a*)  $d_0 = 232$  мм,  $h_1 = 133,5$  мм, и больший диаметр d = 481 мм. Из условия равенства объемов ступенчатой заготовки и поковки определено, что h = 104 мм.

Таким образом, соотношение размеров высаживаемой части заготовки перед высадкой  $h_0 = 1,9 \ d_0$ . Такая заготовка будет обладать надежной устойчивостью при высадке.

По формуле (185) определено, что  $\sigma = -0,335$ .

В качестве диаграммы пластичности для алюминиевого сплава АК6 авторы данной монографии воспользовались кривой, приведенной в работе [69] для алюминиевого сплава Д1. Правомерность такой замены подтверждена в частности в работе [70], где указано, что «область применения сплава АК6 – штамповка и ковка деталей сложной формы и средней прочности наравне со сплавом Д1 там, где требуется большая пластичность в горячем состоянии и допустима несколько меньшая пластичность в холодном состоянии». Кривая в работе [69] построена в координатах «А<sub>р</sub> – σ/Т».

На рис. 6.19. представлена эта кривая, перестроенная в принятые в работе [68] координаты «*e*<sub>n</sub> – *σ*» по формулам

$$e_{\rm p} = 0.577\Lambda_{\rm p}$$
,  $\sigma = 0.577\left(\frac{\sigma}{T}\right)$ . (186)

В работе [68] величина среднего напряжения  $\sigma$  принята в относительном виде (по отношению к напряжению текучести  $\sigma_s = \sigma_i$ , где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений). Поэтому на оси абсцисс графика на рис. 6.19 указано отношение  $\sigma / \sigma_i$ .

Накопленную деформацию в опасной точке A, расположенной на боковой поверхности высаживаемой заготовки в середине ее высоты h, рассчитывают по следующей формуле [68]:

$$e_{i\mathrm{A}} = (1+2\mu)\ln\frac{h_0}{h}.$$
 (187)

По графику на рис. 6.19 определено, что  $e_p = 2,1$ . По формуле (187)  $e_{iA} = 1,752$ . Таким образом,  $e_{iA} \le e_p$ , и разрушения высаживаемой заготовки не произойдет.

Для определения относительной удельной силы высадки фланца применена формула [68]:

$$q = 1 + \frac{\mu d^4 + 0.25d_0^3 d - 0.5\mu d_0^4}{4d^3 h}.$$
 (188)



Рис. 6.19. Кривая пластичности материала заготовки в холодном состоянии

При расчете силы q в формулу (188) подставлены  $d_0 = 232$  мм; d = 481 мм; h = 104 мм;  $\mu = 0,1$ . В результате расчета получено, что q = 1,174. Эта величина относительной (отнесенной к напряжению текучести материала) удельной силы умножена на напряжение текучести сплава АК6. Чтобы воспользоваться графиком для определения напряжения текучести (рис. 6.20), необходимо знание накопленной деформации заготовки  $e_p$ , которая рассчитана по формуле:



Рис. 6.20. Напряжение текучести алюминиевого сплава АК6 при комнатной температуре

В формулу (189) входят показанные на рис. 6.18 величины  $h_0 = 446,5$  мм и h = 104 мм.

Рассчитанная по формуле (189) величина  $e_i = 1,46$ . Из графика на рис. 6.20 следует, что при  $e_i = 1,46$  величина  $\sigma_s = 390$  МПа. Рассчитанная по формуле  $q\sigma_s \pi d^2/4$  сила высадки равна 47600 кН. В соответствии с размерным рядом сил кузнечно-штамповочных машин, для высадки ступенчатой заготовки выбран пресс силой 50 МН. В разработанном технологическом процессе, приведенном на рис. 6.17, заготовки из сплава АК6 предложено нагревать в электрической печи сопротивления камерного типа модели ПН-15, имеющей принудительную циркуляцию воздуха и автоматическое регулирование температуры. Температура нагрева заготовок составляет 410 °C, время выдержки нагретых заготовок при этой температуре 2 ч [71]. Прибор для автоматического регулирования температуры должен обеспечивать точность в пределах  $\pm 10$  °C. Охлаждение изготовленных поковок осуществляется на воздухе. Предусмотрено смазывание заготовок перед штамповкой графитоколлоидной смазкой ГК-1.

Предусмотрен разогрев матриц перед началом штамповки укладываемыми в их полости стальными болванками, нагретыми в камерной электропечи сопротивления до температуры 350 °C. Разогрев пуансона не предусмотрен.

Для определения силы на переходе штамповки полуфабриката пуансоном со сферическим торцом в матрице со сферическим дном исследовано изменение силы по ходу этой формоизменяющей операции, чтобы установить, в какой именно момент сила имеет наибольшее значение [72]. Эксперименты проводили на заготовках из свинца C00, практически не имеющего деформационного упрочнения. Выдавливание осуществляли в матрице с диаметром рабочей полости 30 мм, используя пуансоны с диаметрами рабочих торцов 25 и 15 мм, для которых соответствующий относительный радиус матрицы R (определяемый отношением диаметра матрицы к упомянутому диаметру рабочего торца пуансона) равнялся 1,2 и 2,0. В первом случае опыты проводили с заготовками высотой 11 мм, смазанными смесью индустриального масла 20 и дисульфита молибдена, во втором случае использовали как смазанные, так и обезжиренные ацетоном заготовки высотой 23 мм.

Схема закрытой прошивки заготовок рассматриваемого типа приведена на рис. 6.21.



Рис. 6.21. Схема закрытой прошивки цилиндрической заготовки пуансоном со сферическим торцом в матрице со сферическим дном

Заметим, что коэффициенты трения на поверхностях деформируемой заготовки, показанной на рис. 6.21, различные:  $\mu_1$  – на контакте с пуансоном,  $\mu$  – на контакте с матрицей. Построенный по результатам проведенного исследования типовой график изменения удельной силы по ходу закрытой прошивки детали со сферическим дном показан на рис. 6.22. Удельная сила определена как сила прошивки, деленная на площадь поперечного сечения пуансона. Ниже рассмотрены этапы, обуславливающие особенности формоизменения заготовки, соответствующие отдельным участкам приведенного на рис. 6.22 графика.



Рис. 6.22. Типовой график изменения удельной силы штамповки «стакана» со сферическим дном для заготовки из неупрочняющегося материала по ходу внедрения пуансона

На участке ОА (см. рис. 6.22) происходит внедрение сферического торца пуансона в заготовку и одновременно начинается заполнение сферической полости дна матрицы (рис. 6.21, слева). Верхний очаг пластической деформации 1 отделен от нижнего очага 2 жесткой областью 3.

При рабочем ходе, соответствующем точке А, торец пуансона полностью внедряется в заготовку, после чего наступает квазистационарная стадия деформирования АБ (рис. 6.21, справа). Поскольку на данной стадии вследствие интенсивного заполнения сферической полости матрицы происходит преимущественное перемещение материала заготовки вниз, это вызывает возникновение в области контакта очага пластической деформации *I* и матрицы активно направленных напряжений контактного трения. Для определения удельной силы закрытой прошивки на данной стадии используют приведенную в [72] формулу (190), подставляя значения коэффициента трения по напряжению текучести µ со знаком «–», что соответствует активному действию напряжений контактного трения.

$$q = \sigma_s \left[ 1 + 2\ln\frac{R+1}{2} + 0.385 \frac{R[(\mu+0.5)R + 2\mu_1]}{R-1} \right].$$
 (190)

По мере заполнения сферической полости матрицы перемещение материала заготовки вниз замедляется, в результате чего напряжения контактного трения между верхней частью заготовки и матрицей постепенно меняют свое направление и становятся реактивными, что вызывает соответствующий рост деформирующей заготовку силы на участке БВ (рис. 6.22). Точка В соответствует моменту полного заполнения донной части матрицы (рис. 6.23, слева). Соответствующую этой точке удельную силу вычисляют по формуле (190), в которую подставляют значение µ со знаком «+».



Рис. 6.23. Форма заготовки перед окончанием закрытой прошивки

При дальнейшем ходе пуансона нижняя граница очага пластической деформации *1* перестает соприкасаться с жесткой областью *3* и выходит на поверхность дна матрицы (рис. 6.23, справа), в связи с чем на этой границе предельное касательное напряжение сдвига изменяется на напряжение контактного трения, имеющего меньшую величину.

С учетом этого, удельная сила закрытой прошивки, соответствующая совпадению центров сферических поверхностей пуансона и матрицы (точка Г на рис. 6.22), определяется выражением:

$$q = \sigma_s \left[ 1 + 2\ln\frac{R+1}{2} + 0.77\frac{R(\mu R + \mu_1)}{R-1} \right].$$
 (191)

Таким образом, удельная сила закрытой прошивки заготовки имеет свою наибольшую величину в точке В графика, приведенного на рис. 6.22.

Для расчета силы требуется знание напряжения текучести сплава AK6 при температуре горячей штамповки. Эта температура определена по справочнику [71], она равна 410 °C. График зависимости предела прочности для сплава AK6 от температуры заимствован из работы [70]. При этом, отражающая указанную зависимость прямая пролонгирована до 410 °C, а значения предела прочности, указанные на оси ординат, переведены в МПа, рис. 6.24. Поскольку рассматривается горячая штамповка, и упрочнение металла отсутствует, в расчете в качестве напряжения текучести  $\sigma_s$  сплава принято значение его предела прочности.

Выше при анализе формоизменения заготовки было отмечено, что для заполнения фланца полуфабриката, показанного на рис. 6.16, б, в конце операции закрытой прошивки сферической части полости фланец пуансона осаживает фланцевую часть полуфабриката и оформляет заданную чертежом его форму.



Рис. 6.24. Зависимость предела прочности сплава АК6 от температуры нагрева

Поскольку на участке ВГ графика на рис. 6.22 удельная сила закрытой прошивки существенно снижается, то рассчитанной с помощью формулы (190) силы, соответствующей точке В, должно быть достаточно для штамповки на заключительной стадии сферической части и одновременной осадки фланцевой части полуфабриката.

При расчете удельной силы закрытой прошивки по формуле (190) в нее были подставлены значения R = 1,13;  $\mu = 0,3$ ;  $\mu_1 = 0,4$ . По графику на рис. 6.24 определено, что предел прочности сплава при температуре 410 °C равен 150 МПа. Это значение ов подставлено вместо напряжения текучести от в формулу (190). Такая замена этих параметров является обычной при расчете сил операций горячей штамповки.

В результате расчета получено:  $q_{ob} = 1023$  МПа. Сила  $P_{ob}$ , которую должен развить пресс на первом переходе штамповки, определена как произведение дов на площадь поперечного сечения прошивающего полость пуансона, имеющую диаметр 364 мм. В результате получено  $P_{ob} = 104$  МН.

Для определения силы на переходе штамповки поковки выдавливанием из полуфабриката (см. рис. 6.17, з) использованы результаты анализа, опубликованного в [73]. Примененная в этой работе расчетная схема приведена на рис. 6.23.



Рис. 6.23. Расчетная схема выдавливания трубной части поковки

### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

В результате анализа, проведенного с использованием схемы, приведенной на рис. 6.23, получена формула (192) для расчета величины относительной (отнесенной к напряжению текучести материала заготовки) удельной силы выдавливания. В формуле (192) удельная сила определяется как отношение силы, создаваемой прессом, к площади торца ступени пуансона 8 (рис. 6.17, *з*), передающей осевую силу на фланец полученного на первом переходе штамповки полуфабриката.

Относительную удельную силу выдавливания трубной части поковки вычислили по формуле:

$$q = \frac{1,1}{R^2 - r_0^2} \left\{ 1,5(R^2 - 1) + R^2 \ln R + \left\{ \frac{(R^2 + 1 - 2r_0^2) \left[ 0,5 - 0,25 \left( 1 - \frac{1}{R} \right) \cos \gamma + \mu_1' r_0 \right]}{1 - r_0^2} - 0,5 + \frac{1 - r_0^2}{\sin \gamma - \cos \gamma} \right\} h + \frac{\left( 0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma} \right) \left[ R^4 (\ln R - 0,75) + R^2 - 0,25 \right]}{(R^2 - 1)h} \right\} + (192) + 2 \frac{(\mu + \mu_1' r_0) h_{\pi}}{1 - r_0^2},$$

где  $h_n$  – высота калибрующего пояска матрицы,  $\mu$  и  $\mu'_1$  – коэффициенты трения по напряжению текучести ( $\mu'_1$  характеризует трение в области пластической деформации), R – относительный радиус контейнера. Все указанные на рис. 6.23 размеры имеют относительные величины. Их фактические размеры отнесены к фактическому размеру меньшего радиуса матрицы. Поэтому на рис. 6.23 величина r = 1. Поскольку, как видно на рис. 6.17, з, нижняя часть пуансона  $\delta$ , оформляющая полость выдавливаемой поковки, является единым целым с остальной частью пуансона, в формуле (192) коэффициент  $\mu'_1 = 0,5 \mu$ , как это оговорено в работе [73].

В результате расчета по формуле (192) получено, что относительная (отнесенная к напряжению текучести материала заготовки) удельная сила выдавливания  $q_{\rm ns} = 3,21$ . При горячей штамповке в качестве напряжения текучести материала традиционно используют значение его предела прочности при заданной температуре нагрева. Выше в статье такая замена характеризующих материал параметров уже была использована при расчете удельной силы закрытой прошивки полуфабриката. Для перехода к удельной сила рассчитанная выше величина qпв умножена на предел прочности сплава АК6 при температуре 410 °C, равный 150 МПа. В результате умножения получено  $q_{\rm ns}$  • 150 МПа = 481,5 МПа. Сила  $P_{\rm ns}$ , которую должен развить пресс на втором переходе штамповки, определяется как удельная сила
$q_{\rm пв}$ • 150 МПа, умноженная еще на площадь торца ступени выдавливающего полость пуансона, имеющую внешний диаметр 481 мм и внутренний диаметр 364 мм. После расчета площади кольцевой поверхности торца ступени пуансона, имеющей указанные размеры, и умножения рассчитанной выше величины удельной силы на эту площадь определено значение силы выдавливания  $P_{\rm пв} = 37,5$  MH.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что поковки рассматриваемых деталей рационально изготавливать из предварительно подготовленных ступенчатых заготовок, у которых имеющий высоту 104 мм участок большего диаметра равен диаметру фланца поковки (481 мм), а участок меньшего диаметра, равного 232 мм, имеет высоту 133,5 мм. Установлено, что такие ступенчатые заготовки возможно изготавливать холодной высадкой из отрезанных пилой от прутка цилиндрических заготовок, диаметр которых несколько превышает 232 мм, а длина несколько превышает 580 мм, и обточенных на станке до указанных здесь чистовых размеров. Рассчитанная сила пресса, на котором производится холодная штамповка ступенчатых заготовок высадкой, равна 50 МН.

В связи с тем, что операции горячего формоизменения заготовки выполняются последовательно, при проектировании специализированного пресса из двух определенных выше для каждого перехода деформирующих сил штамповки принята та, которая больше. Это сила операции закрытой прошивки, равная 104 МН.

В сформулированном техническом задании на проектирование специализированного пресса указана величина его силы 100 МН, соответствующая размерному ряду кузнечно-штамповочных машин. Правомерность назначения силы меньшей величины, чем рассчитанная выше, - это большая масса штампуемой поковки. В работе [2] разъяснено, что принцип подобия при проектировании процессов штамповки малогабаритных и крупногабаритных поковок применяют, используя масштабный коэффициент, на который умножают теоретически определенную силу. Это связано с тем, что в расчетные формулы для вычисления сил деформирования входит величина напряжения текучести деформируемого материала σ. Эту величину определяют в лабораторных условиях на малых образцах. Из практики известно, что при обработке давлением геометрически подобных заготовок из одинакового материала, нагретых до одной и той же начальной температуры, удельная сила деформирования уменьшается с увеличением размеров заготовки. Для расчета сил горячей штамповки больших образцов масштабный коэффициент, по данным С.И. Губкина, при увеличении деформируемого объема от 25 до 25000 см<sup>3</sup> имеет значения, уменьшающиеся от 1 до 0,4. С учетом масштабного коэффициента сила разрабатываемого специализированного пресса задана величиной 100 МН с существенным запасом.

### 6.7. Применение вальцов с фигурными полостями для формования высокоплотных изделий из порошковых сталей

Для производства высокоплотных заготовок деталей, в частности, из легированных и сложнолегированных порошковых сталей, авторами данной монографии разработаны оригинальные схемы формования непосредственно порошковых шихт, до их спекания. Эти схемы приведены выше, в п. 4.5, 4.7.

При применении таких схем остаточная пористость деталей, ограничивающая возможность их последующей термической обработки, снижается созданием в уплотняемом материале существенных сдвигов между частицами, исключающих образование пор. Ранее схемы, отличные от схем авторов данной монографии, но также использующие существенные сдвиги между частицами материала, были предложены в работах [33, 34].

Согласно схемам на рис. 6.24, порошковая шихта засыпается со стороны тонкой части полости через верхнее отверстие между оправкой и матрицей.



Рис. 6.24. Расположение элементов штампа и их перемещения при формовании втулки: *a*) начало формования, *б*) окончание формования; *l* – матрица; *2* – оправка со ступенью; *3* – пуансон

При этом оправку опускают, открывая отверстие для засыпки. Порошок хорошо засыпается в расширяющуюся полость матрицы, равномерно заполняя ее. После заполнения порошком всего объема полости матрицы оправку перемещают вверх выталкивателем пресса (рис. 6.24, а), как показано на рисунке стрелкой с указанием  $V_{on}$ . Под действием напряжений контактного трения и благодаря наличию ступени в нижней части оправки порошок хорошо заполняет узкую часть полости матрицы. При этом засыпное отверстие полости матрицы перекрывается оправкой. Опуская силой ползуна пресса матрицу навстречу неподвижному кольцевому пуансону, формуют втулку (рис. 6.24,  $\delta$ ).

В штампе, схема которого приведена на рис. 6.24, пуансон 3 опирается через закаленную прокладку на нижнюю плиту. Ползун пресса воздействует сверху на матрицу *I* штампа, опуская ее навстречу пуансону 3. При

уплотнении, согласно рис. 6.24, на заготовку, помимо нормальных напряжений сжатия, действуют касательные напряжения  $\tau_{\kappa}$  (рис. 6.25). Напряжения тк вызваны трением на поверхностях контакта элементов штампа с формуемым порошком. Под действием тк в материале заготовки возникают сдвиги между частицами порошка, что приводит к закрытию пор и предотвращению, так называемых, перепрессовочных трещин.

Порошок как бы «затягивается» силами трения в тонкую часть стенки. В результате в своей наиболее тонкой части формуемые втулки имеют наибольшую плотность. Это важно, поскольку после формования втулка подвергается спеканию. У спеченной втулки плотность толстой части стенки можно повысить последующей холодной штамповкой. В тоже время, для повышения холодной штамповкой плотности в тонкой части стенки спеченной втулки потребовалось бы создание напряжений, которые не выдерживает даже самый лучший штамповый инструмент.

Фотографии сформованных в соответствии со схемой, приведенной на рис. 6.24, конических втулок были даны на рис. 4.45.

В данном пункте рассматривается деталь удлиненной формы, показанной на рис. 6.26. Однако при изготовлении ее формованием с активно направленными напряжениями трения схема уплотнения порошка, рассматриваемая для поперечного сечения этой детали, имеет сходство со схемой, приведенной на рис. 6.25. Некоторое отличие заключается, в частности, в наличии ступеньки на внешней поверхности детали, изображенной на рис. 6.26.

При формовании на прессах деталей из порошковых шихт универсальные прессы работают с невысоким КПД. Для обоснования этого утверждения рассмотрена традиционная схема формования порошковой шихты в закрытой матрице (без активно направленных напряжений контактного трения), приведенная выше на рис. 6.12.



Рис. 6.25. Схема действия касательных напряжений  $\tau_{\kappa}$  при формовании по схеме на рис. 6.24



**Рис. 6.26.** Деталь, для которой разрабатывается операция формования

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

При засыпке в матрицу (см. рис. 6.12) порошковая шихта укладывается с плотностью, указанной в марке порошка. В частности, предположим, что деталь изготавливается из ПЖВ2.160.28. Последние две цифры в марке порошка характеризуют засыпную плотность - 2,8 г/см<sup>3</sup>. Если теоретическая плотность железа равна 7,85 г/см<sup>3</sup>, и засыпанную в матрицу шихту удастся уплотнить до этой плотности, то  $l_0 / l = 2,8$ . В большом ходе деформирования заключается отличие штамповки порошковых деталей от штамповки деталей из компактных материалов. При штамповке заготовки из компактного материала хода пуансона, равного  $l_0 - l$ , не требуется, а также на величину  $l_0 - l$ меньше необходимая глубина матрицы. При уплотнении заготовки по традиционной схеме, приведенной на рис. 6.12, плотность, равная 82 ... 85% от теоретической плотности железа достигается при удельной силе  $q_{1}$  равной  $4P / (πD^2)$ , где D – диаметр полости матрицы, равной 600 ... 800 MПа. С позиции обработчика давлением, такое давление не является высоким. Кроме того, достижение такого давления происходит только на заключительной стадии уплотнения заготовки по схеме, приведенной на рис. 6.12.

Помимо большого хода уплотнения заготовки от высоты  $l_0$  до высоты lдо начала уплотнения шихты пуансон должен пройти внутри полости матрицы расстояние, необходимое, чтобы было обеспечено его центрирование и направление относительно полости. После окончания уплотнения шихты ползун пресса должен совершить значительный возвратный ход, чтобы пуансон вышел из полости матрицы и поднялся над матрицей на расстояние, позволяющее извлечь сформованную заготовку и засыпать в матрицу новую порцию шихты. Устройства для засыпки порошковой шихты имеют большие размеры по сравнению с устройствами для подачи в пресс обычных штучных заготовок. В тоже время, поскольку пресс обладает заданной ему его конструкторами технической характеристикой, согласно этой характеристике, большая величина рабочего хода соответствует прессу с большой величиной номинальной силы. Такая большая величина силы пресса не требуется для формования порошковой шихты. Поэтому пресс, выбранный, исходя из требуемой величины рабочего хода его ползуна, будет иметь значительное превышение его номинальной силы по сравнению с силой, необходимой для уплотнения шихты. Поскольку большая часть силы пресса остается невостребованной, пресс работает с незначительным КПД.

При рассмотрении загрузки шихты, направления пуансона в полости матрицы и извлечения формованной заготовки из штампа, приведенные в комментарии к рис. 6.12 обоснования работы пресса с незначительным КПД, остаются такими же и при формовании заготовки по схеме на рис. 6.24.

Повышение КПД пресса и одновременно расширение вариантов формы деталей, по сравнению с изготовлением их по схеме, приведенной на рис. 6.24, достигается при замене матрицы вальцами, как это показано на рис. 6.27, имеющими профилированные полости. Вальцы поворачиваются через систему рычагов от ползуна пресса.



Рис. 6.27. Формование порошковой заготовки в матрице, образованной вальцами

При принудительном повороте вальцов 3 объем засыпанной порошковой шихтой полости уменьшается, и происходит формование порошковой детали. Одновременно с поворачивающимися вальцами, формование производится сближающимися пуансоном 5 и оправкой 1. Втулочный пуансон 2 формует нижний торец детали, а втулочный пуансон 4 – верхний торец.

При повороте вальцов создаются активно направленные напряжения контактного трения  $\tau_{\kappa}$ , аналогично схеме, приведенной на рис. 6.25, под действием которых в материале заготовки возникают сдвиги между частицами порошка, что приводит к закрытию пор и предотвращению, так называемых, перепрессовочных трещин. Поэтому давление на пуансонах *1*, *2*, *4*, *5* может быть увеличено свыше 800 МПа без образования трещин в формуемой заготовке, и может быть достигнута плотность, близкая к 100% от теоретической плотности железа в наиболее тонкой части стенки формованной детали. Применение вальцов в качестве матрицы для формования позволяет расширить варианты внешней формы изготавливаемых деталей, по сравнению со схемой уплотнения, приведенной на рис. 6.24.

Таким образом, предложенное формование порошковой шихты в поворачивающихся вальцах, выполняющих роль активной матрицы, позволяет осуществить изготовление детали сложной формы с тонкими элементами из порошковой стали, имеющей практически неограниченное легирование. Совмещение формования шихты в вальцах с традиционным уплотнением этой же порции шихты перемещающимися в направлении хода ползуна пресса формующими порошковую шихту пуансонами позволяет сократить величины перемещений пуансонов при действии в процессе этих перемещений больших давлений на пуансоны, по сравнению с традиционными схемами формования порошковых деталей. В результате становится возможным использовать прессы с меньшими величинами их рабочих ходов и, в соответствии с техническими характеристиками этих прессов, с меньшими номинальными силами. Таким образом, повышается КПД работы прессов.

### 6.8. Комбинированная холодная штамповка на специализированном прессе деталей типа тонкостенных стаканов с толстым дном

Для изготовления XOШ деталей типа глубоких тонкостенных цилиндрических стаканов с толстым, возможно фасонным, дном традиционно применяют следующую последовательность операций [54]. Из заготовки, отрезанной от прутка или проволоки, закрытой прошивкой изготавливают стакан. После прошивки осуществляют утонение стенки стакана вытяжкой с образованием ее постоянной или переменной толщины, штамповку дна с приданием ему требуемой формы.

При наличии специализированного пресса изготовление указанных в заглавии данного пункта деталей осуществляется с применением нового [74] технического решения, рассмотренного ниже. Отличие нового технического решения от традиционного состоит в том, что, помимо снижения удельной силы на пуансоне, закрытую прошивку стакана и утонение его стенки



вытяжкой производят за одну непрерывную операцию. Эту операцию реализуют на созданных по чертежам авторов данной монографии специализированных прессах, конструкции которых описаны в п. 5.4.

Последовательность этапов деформирования заготовки и штамповки детали указанного в заглавии статьи типа на специализированном прессе показана на рис. 6.28–6.30. На этих рисунках слева от оси приведены исходные, а справа от оси – конечные положения элементов штампа в каждой из рассматриваемых стадий штамповки.

**Рис. 6.28.** Исходное положение инструментов (слева) и закрытая прошивка, совмещенная с раздачей стенки изготавливаемого стакана (справа): *P*<sub>1</sub> – сила на неподвижном пуансоне, прошивающем полость в заготовке; *H* – величина рабочего хода контрпуансона *4*, продвигающего деформируемую заготовку со скоростью *v* 

Штамп на рис. 6.28 содержит неподвижный пуансон 1, который имеет со стороны рабочего торца диаметром d конический участок с углом  $\beta$ . Также штамп содержит матрицу 2 с коническим (с углом  $\alpha$ ) участком и цилиндрическими участками с диаметрами D и  $d_1$ . Заготовка для штамповки 3 имеет диаметр  $d_1$ . Также штамп содержит толкатель 4 с диаметром  $d_1$ , вставленный в нижнюю цилиндрическую полость матрицы. Диаметр  $d_1$  превышает диаметр d пуансона на величину, равную удвоенной толщине цилиндрической стенки изготавливаемой детали.

Углы а и β выбираются, как показано в п. 2.6, из условия, что толщина стенки в конической части штампуемого стакана уменьшается по мере продвижения материала заготовки в направлении цилиндрической части стакана. Это обеспечивает гидростатическое давление в конической части, необходимое для предотвращения трещинообразования при раздаче.

Площадь поперечного сечения стенки изготавливаемого закрытой прошивкой стакана на выходе деформируемого металла из его конической части равна площади поперечного сечения стенки стакана в его цилиндрической части.

На рис. 6.29 показаны заключительная стадия предшествующего этапа закрытой прошивки и стадия закрытой прошивки, совмещенной с утонением стенки штампу-емого стакана.

Указанная стадия производится в этом же инструменте, при одновременной штамповке дна стакана с приданием дну требуемой формы. Анализу именно этого этапа штамповки посвящено впервые проведенное авторами исследование, описанное ниже.

На рис. 6.30 показан следующий этап: вытяжки стакана с утонением его стенки при отсутствии дальнейшей прошивки донной части.



Рис. 6.29. Заключительная стадия (слева) предшествующего этапа закрытой прошивки и стадия продолжения закрытой прошивки (справа), совмещенной с утонением стенки штампуемого стакана в его придонной части



Рис. 6.30. Заключительная стадия предшествующего этапа закрытой прошивки (слева) и стадия вытяжки (справа) для утонения стенки по всей ее высоте

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

Поскольку при традиционном изготовлении тонкостенного стакана его закрытая прошивка и утоняющая стенку вытяжка являются разделенными между собой во времени переходами штамповки, имеет место явление, отмеченное в работе [54]. Там указано, что в начале вытяжки с утонением стенки происходит деформация дна, осуществляемая с малыми степенями деформации. В сочетании с термической обработкой это может привести к скачкообразному росту зерен металла в дне изготавливаемой детали. Также при выполнении раздельных переходов штамповки возможно ухудшение качества изделия, связанное с установкой изготовленного закрытой прошивкой стакана в предназначенную для вытяжки матрицу другого штампа. Устанавливаемый в штамп для вытяжки стакан имеет внутренний диаметр, превышающий диаметр пуансона, осуществляющего вытяжку. При этом возможно, пусть весьма незначительное, но эксцентричное положение заготовки и инструмента в начале операции вытяжки. Отметим также образование при традиционном изготовлении рассматриваемых деталей, так называемого, незавершенного производства. Это выражается в накоплении в технологическом процессе полуфабрикатов в виде штампованных закрытой прошивкой и ожидающих последующую вытяжку стаканов. При этом в полуфабрикатах происходит явление старения их материала.

Задачей описанного здесь нового технического решения является устранение отмеченных выше недостатков традиционного технологического процесса, в частности, увеличение возможной степени деформации при вытяжке стенки стакана с утонением благодаря устранению старения материала в промежутке между переходами штамповки, повышению точности соблюдения толщины стенки и таким образом повышению в целом качества изделия. Одновременно сокращается до одной количество операций штамповки путем совмещения закрытой прошивки и вытяжки и, как следствие, снижается себестоимость продукции.

При показанной на рис. 6.30 штамповке тонкостенного стакана на специализированном прессе деформирование заготовки происходит непрерывно, без промежуточной термической обработки, и все стадии деформирования заготовки производятся в одном и том же комплекте штампового инструмента, в результате отмеченные выше отрицательные эффекты при выполнении штамповки традиционным способом отсутствуют.

На рис. 6.31 изображен график изменения силы *P*, которая действует на заготовку *3* со стороны пуансона *I* (см. рис. 6.28), для трех указанных выше этапов штамповки, в зависимости от времени, занимаемого каждым этапом.

Рассмотрение штамповки конкретной детали проведено на отрезанных в штампах и калиброванных осадкой в закрытой матрице заготовках из латуни Л63. После калибровки заготовки были подвергнуты термической обработке. При ХОШ латуней их напряжение текучести возрастает очень интенсивно. Поэтому силы, показанные на рис. 6.31, изменяются между этапами так существенно. В связи с этим штамповка в холодном состоянии



**Рис. 6.31.** Силы *P*<sub>1</sub>, *P*<sub>2</sub>, *P*<sub>3</sub> штамповки детали из латуни Л63 для трех рассмотренных выше этапов, в зависимости от времени t, занимаемого каждым этапом

заготовок из латуни является более трудной, чем штамповка заготовок не только из прочных алюминиевых сплавов типа Д1 и Д16, но даже и из углеродистых сталей 20 и 30.

С целью начального уменьшения их напряжения текучести заготовки из латуни Л63 были подвергнуты термической обработке: нагреву до температуры 550 °C, проведенному со скоростью 180...200 °C/ч, выдержке при этой температуре в течение 2 ч и плавному охлаждению на воздухе, имевшем комнатную температуру, при отсутствии сквозняков.

При выполнении за один переход показанных на рис. 6.28–6.30 этапов формоизменения заготовок ниже рассчитаны необходимые для этих этапов силы. Сила  $P_1$  действует при холодной закрытой прошивке стакана (этап 1), имеющего внешний диаметр D = 25,8 мм и диаметр полости d = 20 мм, из заготовки, имеющей исходный диаметр  $d_1 = 23,5$  мм в матрице с углом конусности  $\alpha = 150$ . Сила  $P_2$  действует при совмещении закрытой прошивки с вытяжкой с утонением прилегающей к дну детали части стенки изделия (этап 2), имеющей цилиндрические поверхности с внешним диаметром  $d_1 = 23,5$  мм и внутренним диаметром 20 мм, из штампованного на предыдущем этапе стакана. Сила  $P_3$  действует при продолжаемой, после остановки толкателя 4, вытяжке (этап 3) с утонением стенки полуфабриката. Вытяжка

Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

производится перемещением только матрицы до получения завершенного изделия с высотой стенки l = 100 мм, имеющего диаметры  $d_1$  и  $d_2$ .

Выше, в п. 2.6, путем планирования и обработки результатов многофакторного физического эксперимента была получена следующая математическая модель, которая связывает величину относительной удельной силы на торце пуансона  $q/\sigma_s$  с углом конусности матрицы  $\alpha$  и соотношением D/d (см. рис. 6.28):

$$q/\sigma_s = 48,76 + 20,8(D/d)^2 - 62,16(D/d) - 0,089 \alpha.$$
 (193)

Напряжение текучести  $\sigma$ s определено для латуни Л63 по графику, приведенному в справочнике [1]. График изменения  $\sigma_s$  приведен в зависимости от степени деформации е.

При штамповке деталей типа стакана е допускается определять по формуле (1).

Для этапа 1 штамповки рассматриваемой детали

$$\varepsilon_1 = [23,5^2 - (25,8^2 - 20^2)] / 23,5^2 = 0,519.$$

Рассчитанной степени деформации соответствует определенное по графику напряжение текучести  $\sigma_{s1} = 550$  МПа.

По формуле (193) определена удельная сила на торце пуансона при первом этапе штамповки:

$$q_1 = 550 [48,76 + 20,8(25,8/20)^2 - 62,16(25,8/20) - 0,089 \cdot 15] = 1017 \text{ MIIa}.$$

Сила  $P_1$  равна удельной силе  $q_1$ , умноженной на площадь поперечного сечения пуансона I в его приторцовой цилиндрической части (рис.6.28):  $\pi d_2/4$ . Величина этой силы составляет 320 кН (см. рис. 6.31). При таком значении силы  $P_1$  штампуется стакан, показанный на рис. 6.28, справа от оси.

На этапе 2 штамповки заключительную стадию закрытой прошивки и начало утонения стенки штампуемого стакана вытяжкой, производят непрерывно с этапом 1 и в одном инструменте, как показано на рис. 6.29, создавая на пуансоне *1* удельную силу, превышающую удельную силу на предшествующей стадии закрытой прошивки в 1,5...2,5 раза. Такой интервал давлений аргументирован в работе [74]. Однако в настоящем пункте данной монографии этой аргументации дано дальнейшее развитие на основании описанного ниже анализа.

При расчете в данной решаемой задаче превышения удельной силы на рассматриваемом этапе 2 по сравнению с предыдущим этапом учтено, что изготавливаемая закрытой прошивкой стенка стакана становится тоньше, поэтому степень деформации повышается по сравнению с предыдущим этапом и, соответственно, повышается напряжение текучести об материала заготовки. При заданных размерах детали

$$e_2 = [23,5^2 - (23,5^2 - 20^2)] / 23,5^2 = 0,724.$$

Рассчитанной степени деформации соответствует определенное по графику [1] напряжение текучести  $\sigma_{c2} = 700$  МПа.

Относительная удельная сила  $q/\sigma_s$  на торце пуансона при изготовлении закрытой прошивкой детали с тонкой стенкой в неподвижной матрице (т.е. без использования рассматриваемого здесь технического решения) определена по графику, приведенному выше на рис. 2.4. По оси абсцисс приведенных на рис. 2.4 графиков отложено отношение  $R = d_1/d$  (см. рис. 6.28),  $\mu$  – величина фактора трения.

При заданных размерах рассматриваемой детали R = 23,5 / 20 = 1,175, и, при  $\mu = 0,1, q/\sigma_s = 3,9$ .

Тогда, с учетом величины σ<sub>s2</sub> = 700 МПа удельная сила q при штамповке в неподвижной матрице составила бы 2730 МПа. При таком значении удельной силы выполнение операции закрытой прошивки лимитируется или разрушением, или очень низким сопротивлением пуансона усталости.

Закрытую прошивку на этапе 2, в соответствии с рассматриваемым здесь техническим решением, выполняют с противонатяжением стенки стакана (см. рис. 6.29), осуществляемым вследствие принудительного перемещения матрицы вверх. Как следует из [1] удельная сила на пуансоне  $q_2$  вследствие противонатяжения стенки снижается до величины, равной 0,58 от удельной силы q, определенной выше для закрытой прошивки в неподвижной матрице.

Следовательно,  $q_2 = 0,58 \cdot 2730 = 1583$ МПа. Таким образом, на рассматриваемом этапе закрытой прошивки, совмещенной с вытяжкой, создают превышение удельной силы  $q_2 / q_1 = 1583/1017 = 1,56$ . Такое превышение удельной силы укладывается в обоснованный в работе [74] диапазон: в 1,5...2,5 раза. Отметим, что величина превышения удельной силы зависит от толщины стенки изготавливаемого стакана. По мере утонения стенки необходимое превышение удельной силы возрастает. При  $q_2 = 1583$  МПа сила штамповки  $P_2$  составляет 497 кН (см. рис. 5). Указанной силе соответствует ступенька на графике  $P_2$ .

Совмещенную с вытяжкой закрытую прошивку с рассчитанной силой осуществляют до получения цилиндрических поверхностей изделия на уровне кромки рабочей части пуансона *I* (см. рис. 6.29, справа от оси).

При расчете силы противонатяжения, которую требуется создать приводом матрицы при ее принудительном перемещении вверх, руководствуются следующим условием. Напряжение в наиболее тонком поперечном сечении стенки стакана, через которую создают противонатяжение, направленное вдоль оси детали, не должно превышать напряжения текучести  $\sigma_{s2}$ . При этом силу перемещения матрицы рассчитывают как произведение  $\sigma_{s2}$  на площадь наиболее тонкого поперечного сечения стенки стакана. Это произведение умножают также на коэффициент запаса прочности, значение которого меньше 1.

В данном пункте проведен уточненный анализ этапа 2 деформирования заготовки. В уточненном анализе учтен переходный процесс, возникаю-

щий в приводе пресса при изменении силы от величины, необходимой для осуществления этапа 1 деформирования, совмещенного с раздачей стенки стакана (рис. 6.28), до величины, необходимой для закрытой прошивки утоненной стенки детали на этапе 2 (рис. 6.29). Необходимость учета переходного процесса объясняется очень коротким промежутком времени (см. рис. 6.31), занимаемым этапом 2. Как видно из графика на рис. 6.31, построенного на основании приведенных выше расчетов, сила P<sub>2</sub>, требующаяся для осуществления этапа 2 штамповки, больше силы Р<sub>1</sub>. Перемещающий матрицу 2 вверх привод пресса должен накопить большую силу и это требует времени. Уменьшение расстояния между торцами пуансона *I* и толкателя 4 и обеспечиваемое таким образом деформирование заготовки 3 протекают непрерывно. При накоплении в приводе пресса необходимой силы матрица 2 несколько запаздывает по отношению к скорости вытекания металла заготовки, перемещаемой толкателем 4 в образующуюся тонкую стенку детали. Также следует учесть, что в связи с уменьшением площади поперечного сечения стенки (см. рис. 6.29, справа), скорость течения металла в ней возрастет по сравнению со скоростью течения на предшествующем этапе деформирования, показанном на рис. 6.29, слева.

В результате переходный процесс от этапа 1 к этапу 2 штамповки характеризуется временным нарушением контакта между формируемой стенкой стакана и стенкой полости матрицы, как показано на рис. 6.32. Вследствие указанного нарушения контакта матрица не может сразу создать в стенке деформируемой заготовки противонатяжение и таким образом снизить усредненное давление на пуансоне до величины, равной 0,58 от усредненного давления *q*, определенного выше для закрытой прошивки в неподвижной матрице.

В результате в рамках показанного на рис. 6.29 этапа 2 будет иметь место быстрый рост давления до величины  $q_2'$ , большей, чем величина  $q_2 = 1583$  МПа, определенная выше для закрытой прошивки стакана с противонатяжением его стенки.



Рис. 6.32. Нарушение контакта между формируемой стенкой штампуемого стакана и стенкой полости матрицы

В тоже время, величина  $q_2'$  меньше величины удельной силы q, определенной выше по графику на рис. 2.4 для закрытой прошивки в неподвижной матрице. Это объясняется тем, что благодаря перемещению матрицы в направлении течения металла в стенку стакана, ниже фланца заготовки на поверхности формируемой тонкой части его стенки действуют активно направленные напряжения контактного трения  $\tau_a$ .

Поэтому для определения величины  $q_2'$  по графикам на рис. 2.4 надо использовать данные, отражаемые пунктирными кривыми. При заданных размерах конкретной детали R = 23,5 / 20 = 1,175, и при  $\mu = 0,1 q/\sigma_s = 3,7$ . Поскольку,  $\sigma_{s2} = 700$  МПа,  $q_2' = 2590$  МПа. По кривой сопротивления пуансонов усталости (рис. 1.2) определено, что при таком давлении пуансон выдержит примерно 1000 циклов штамповки.

Заметим, что кривая на рис. 1.2 построена для определения сопротивления пуансонов усталости, выдерживающих удельную силу q, которая действует на их торец в течение промежутка времени, измеряемого секундами или десятками секунд, в зависимости от размеров штампуемой детали и типа штамповочного пресса. При штамповке, рассматриваемой в данном пункте, время всплеска давления, соответствующего закрытию показанной на рис. 6 полости между фланцем заготовки и матрицей, составляет долю секунды. Это позволяет предположить, что сопротивление пуансона усталости при использовании разработанного способа штамповки будет большим, чем оцененное по кривой на рис. 1.2.

Максимальная сила *P*, на втором этапе штамповки составляет 813,3 кН.

Сила  $P_3$  на заключительном этапе вытяжки стенки стакана с ее утонением рассчитана с использованием примера, приведенного в работе [54]. В этом примере производится вытяжка стакана с размерами, совпадающими с размерами стакана, рассматриваемого в данной статье. Однако материал стакана в работе [54] имеет  $\sigma_s = 450$  МПа, что характерно для заготовки из малоуглеродистой стали. Для стали с таким  $\sigma_s$  величина осевого напряжения  $\sigma_s$  в подвергаемой утонению стенке стакана при угле конусности матрицы  $\alpha = 15^\circ$  составила 400 МПа.

В данном пункте это осевое напряжение пересчитано на деформирование латунной заготовки, имеющей  $\sigma_{s2} = \sigma_{s3} = 700$  МПа. В результате получено:  $\sigma_{z} = 400 \cdot 700 / 450 = 622$  МПа.

Сила (см. рис. 6.31), необходимая для выполнения третьего этапа штамповки, определяется как произведение осевого напряжения  $\sigma_z$  в вытягиваемой с утонением стенке стакана на площадь *F* поперечного сечения этой стенки:  $F = \pi (d_1^2 - d^2) / 4 = 119,5$  мм<sup>2</sup>. Рассчитанная сила  $P_3 = 74,3$  кH.

Для преодоления возникающей на этапе 2 проблемы нарушения контакта между формируемой стенкой стакана и стенкой полости матрицы, показанного на рис. 6.32, целесообразно продолжить разработку описанного в данном пункте нового способа ХОШ. При этом желательно исключить этап деформирования, показанный на рис. 6.32, связанный с переходным процессом в перемещении деформирующих заготовку инструментов.

### 6.9. Производство стаканов с фланцем в донной части холодным выдавливанием на специализированном прессе

В работе [75] приведены фотографии деталей типа подпятников, используемых в узлах трения. Показано преимущество изготовления таких деталей ХОШ, которое, в частности, заключается в увеличении их прочности. Подпятники изготавливают из коррозионно-стойкой и жаропрочной стали 12Х18Н9Т. Вследствие увеличения прочности при изготовлении ХОШ увеличивается износостойкость таких деталей, заключающаяся в их сопротивлении истиранию.



Рис. 6.33. Эскиз детали типа подпятника

Рассматриваемые в работе [75] детали имеют форму, показанную на рис. 6.33.

Для изготовления таких деталей ХОШ авторы указанной работы применили схему штамповки, в которой заготовку с диаметром, равным диаметру фланца изготавливаемой детали, деформирует воздействующий на её верхний торец опускающийся пуансон, имеющий диаметр, равный диаметру заготовки. В результате описанного движения

деформирующего заготовку пуансона производится выдавливание нижней части заготовки в сужающуюся полость матрицы.

Внешний диаметр нижней части заготовки уменьшается, при этом на её верхней, недеформированной части, остается фланец. Одновременно с уменьшением диаметра части заготовки, расположенной ниже фланца, в ней осуществляется закрытая прошивка полости. Рабочий торец пуансона, осуществляющего закрытую прошивку полости в части заготовки уменьшенного диаметра, направлен навстречу пуансону, перемещаемому от ползуна пресса. Поскольку в обсуждаемой работе приведены схематично элементы деформирующего заготовку инструмента, без описания конструкции штампа в целом, можно только предположить, что расположенный снизу прошивающий полость пуансон опирается на неподвижную нижнюю плиту штампа.

Это предположение подтверждается термином «прямое выдавливание», примененным авторами в заглавии работы [75]. В области холодного выдавливания изделий типа стакана был период, когда исследователи пытались найти новые эффекты по снижению деформирующей силы. Эти исследователи сосредоточили свое внимание на изменении направления течения выдавливаемого метала с «обратного» на «прямое». Указанные поиски были рассмотрены выше, в п. 1.2, где было показано отсутствие связи существенного изменения силы выдавливания с изменением направления течения металла. В тот же период, оценивая возможность практической реализации прямого выдавливания, было установлено, что с применением универсальных прессов его реализация вызывает существенные проблемы.

В работе [75] рассматривается ХОШ стали, требующей создания осуществляющим закрытую прошивку полости пуансоном очень высоких давлений со стороны его рабочего торца. Это усиливает отмеченную выше проблему реализации «прямого выдавливания». Сказанное заключается в ограниченной возможности разместить под опорным торцом прошивающего полость пуансона опорную прокладку, закаленную на твердость 57...59 *HRC*. Прокладка должна иметь площадь, обеспечивающую уменьшение действующего на рабочий торец пуансона давления как минимум в 12...15 раз при передаче его на нижнюю плиту штампа. Это необходимо, чтобы противоположный рабочему опорный торец пуансона не стал деформировать нижнюю плиту. Подчеркнем, что в указанном количестве раз имеется в виду не площадь торца опорной прокладки, а площадь контакта нижнего торца прокладки с нижней плитой штампа. Если в местах соприкосновения с прокладкой в плите штампа имеются полости, то площадь полостей исключается из расчета величин давлений, действующих на плиту. Помимо большой площади, прокладка должна иметь большую толщину, чтобы не происходила её значительная упругая деформация. Толщина прокладки определяется следующим образом. Обозначим крайнюю точку контакта нижнего торца пуансона с прокладкой буквой А, а крайнюю точку контакта нижней поверхности прокладки с плитой штампа – буквой Б. Соединим буквы А и Б мнимой прямой линией. Необходимо, чтобы угол между этой мнимой прямой и вертикальной осью штампа не превышал 40°.

Плита штампа не может обладать твердостью, обеспечиваемой закаливанием. Возможны только её термические обработки в виде нормализации или, при допущении существенных бюджетных затрат, – улучшения. Если в нижней плите возникнут пластические деформации, в пуансоне образуются изгибающие напряжения. Поскольку осуществляющий закрытую прошивку полости в заготовке пуансон закален на очень высокую твердость и на его рабочий торец действуют очень высокие давления, под действием изгибающих напряжений пуансон разрушится. Рассматривая твердость, на которую закаливают пуансон, отметим, что накопленный специалистами в области ХОШ многолетний опыт привел к рекомендации соблюдать показатель 61...63 HRC. Это связано с тем, что пуансон, даже при правильно сконструированном узле его опоры на плиту штампа, помимо твердости, должен обладать хотя бы элементарной пластичностью, чтобы не быть слишком хрупким. Выше, в п. 5.1, обсуждена проблема осадки пуансона, закаленного на указанную твердость, имеющей место в его стержневой части на начальном этапе использования пуансона для прошивки полостей. В этой работе отмечено, что после штамповки первых деталей стержневую часть пуансона, у которой появилась бочкообразность, корректируют обтачиванием эльборовым резцом на токарном станке. Иначе эта бочкообразная стержневая часть будет с натягом запрессовываться в штампованную стенку стакана, находящуюся уже в твердом состоянии. Помимо увеличения силы штамповки, это существенно затруднит снятие изготовленного стакана с пуансона.

Непосредственно деформирующая заготовку торцовая рабочая часть пуансона должна быть сконструирована таким образом, чтобы обеспечить закрытую прошивку полости в заготовке при наименьшем осевом давлении между пуансоном и деформируемой заготовкой. Исследованию давлений посвящен ряд публикаций. Однако в них уделено недостаточно внимания влиянию формы торца пуансона на удержание смазочного материала на контакте заготовки с деформирующим её торцом пуансона. В результате совместного решения указанных задач установлено, что рабочая часть пуансона должна иметь форму усеченного конуса. Размеры усеченного конуса приведены выше, в п. 5.1 в зависимости от относительной (по отношению к диаметру рабочей части пуансона) толщины штампуемой стенки детали.

Здесь подчеркнем, что предварительно подготовленным для штамповки заготовкам, путем их калибрования на отдельном прессе, должна быть придана форма с наличием на верхних их торцах углубления, точно соответствующего форме торца пуансона. Это углубление предназначено как для центрирования пуансона на начальном этапе закрытой прошивки полости в заготовке, так и для увеличения площади поверхности участка заготовки, контактирующего на начальном этапе с пуансоном. Этот участок поверхности заготовки оксалатирован и омылен для создания промежуточного слоя смазочного материала, который прошивающий полость пуансон без разрыва должен растянуть при очень высоком контактном давлении на всю поверхность прошиваемой полости. Поэтому площадь исходного для растяжения участка должна быть достаточно большой.

При необходимости изготовления полости детали, имеющей плоское дно, без галтели при переходе к стенке, такое дно рационально изготавливать последующим фрезерованием концевой фрезой. Фрезерование после штамповки осуществить проще, чем калибрование торца дна путем дополнительной штамповочной операции. При калибровании пуансоном с плоским торцом очень важно точно дозировать объем смазочного материала, вносимого в полость заготовки. Даже при незначительном избытке смазочного материала будет происходить его прорыв из-под торца калибрующего пуансона, сопровождаемый искрами и громким хлопком. При этом на острой кромке калибрующего пуансона образуется канавка, и дорогостоящий пуансон портится, без возможности его восстановления.

Вернемся к рассмотрению указанных выше требований к конструированию узла опоры расположенного внизу пуансона, осуществляющего закрытую прошивку полости в заготовке. Оно осложнено необходимостью обеспечения работы выталкивателя штампованной детали из штампа. Выталкиватель так же, как и пуансон, размещается на оси штампа в нижней его плите, и выбор вариантов его работоспособной конструкции осложняется требованием размещения прокладки для опоры нижнего пуансона на плиту штампа.

Помимо действующего давления на контакте опорной прокладки с плитой штампа на возможность реализации ХОШ труднодеформируемых материалов влияет соотношение размеров штампа в плане и рабочего стола пресса. Это связано с тем, что деформирующая заготовку сила при операции закрытой прошивки заготовки достигает своего значения, близкого к наибольшему, на начальной стадии и остается приблизительно постоянной до конца прошивки. Сила, развиваемая кривошипным прессом, зависит от расстояния ползуна от нижней точки его рабочего хода и значительно уменьшается с увеличением этого расстояния. Сила вблизи нижней точки в паспорте пресса обозначается как номинальная. Поэтому для штамповки приходится выбирать пресс, паспортная номинальная сила которого значительно превышает требуемую для выполнения закрытой прошивки силу. Выбранный пресс, обеспечивающий большую номинальную силу, имеет крупное отверстие в центре его рабочего стола, предназначенное для размещения выталкивателя пресса. Если нижняя плита штампа имеет недостаточно большую толщину, несмотря на правильно сконструированную прокладку для опоры нижнего пуансона, не допускающую вдавливания этой прокладки в плиту штампа, имеет место деформация плиты штампа, на участке, расположенном над отверстием в центре рабочего стола пресса. Под действием силы, развиваемой ползуном пресса, осуществляется начальная стадия выдавливания участка нижней плиты штампа в отверстие в центре стола пресса. В результате такой деформации нижней плиты штампа происходит нарушение вертикального расположения направляющих колонок штампа. Колонки своими верхними концами наклоняются навстречу друг другу.

Указанное выше некоторое выдавливание нижней части плиты штампа в отверстие в столе пресса происходит на начальной стадии использования штампа. Чтобы небольшая пластическая деформация нижней плиты на начальной стадии работы штампа произошла симметрично по отношению к оси штампа, в отдельных конструкциях прессов в центре их ползуна предусматривают полость под центровик штампа. В эту полость при установке штампа на пресс должен углубиться центровик, прикрепленный снаружи к верхней плите штампа, чтобы штамп был установлен точно по центру ползуна. Поскольку возможна ситуация, что при установке штампа на кривошипный пресс центровик не сразу попадет в предусмотренную для него полость в ползуне, центровик изготавливают из недорогой и непрочной стали, чтобы в указанной ситуации деформировался центровик, а не ползун пресса. В штампе нетолстый фланец центровика утоплен в углубление в центре верхней плиты и прикреплен к плите винтами. При установке на пресс крепление штампа к ползуну осуществляется с использованием прорезей в верхней плите штампа с помощью специальных болтов, квадратные головки которых входят в U-образные пазы в ползуне пресса, расположенные перпендикулярно его фронтальной стороне. Если U-образные пазы в ползуне пресса расположены шире, чем габарит плиты штампа, для крепления применяют 4 плоских накладки, имеюцие существенные толщину и ширину. В середине накладок выполняют отверстия. С использованием этих отверстий накладки одевают на болты, вставленные в U-образные пазы в ползуне пресса, и навинчивают (наживляют) гайки на эти болты. Эти гайки не позволяют накладкам упасть с болтов. Стороны накладок, расположенные ближе в оси ползуна пресса, подводят под 4 угла верхней плиты штампа, а между ползуном и свободными сторонами этих накладок устанавливают подкладные цилиндры или кубики, высота которых равна толщине плиты штампа. После этого гайки на болтах затягивают.

Рациональные варианты конструкций штампов для ХОШ деталей типа стаканов на универсальных прессах приведены выше, в п. 2.3 и 5.1. Подчеркнем, что в п. 2.3 и 5.1 закрытая прошивка детали типа стакана производилась при её размещении дном вниз, а прошивающий полость пуансон устанавливался на верхней плите штампа. На нижнюю плиту штампа устанавливался пуансон с диаметром рабочей его части, равным внешнему диаметру стакана. Напряжения в этом пуансоне являются значительно меньшими, чем в пуансоне, осуществляющем закрытую прошивку полости в детали. Тем не менее, решение описанной выше проблемы обеспечения размеров и прочности прокладки под торцом нижнего пуансона в сочетании с конструированием выталкивателя детали из штампа является актуальным.

Описанная выше проблема кардинально решается при применении специализированных прессов, сконструированных для деформирования заготовки в матрице, имеющей отдельный привод для её принудительного перемещения в процессе штамповки. Сборочные чертежи таких прессов, разработанных под руководством авторов настоящей монографии, приведены выше в п. 5.4. На рис. 5.32 показана упрощенная схема такого пресса, имеющего гидравлический привод.

Ниже проводится описание расположения и последовательности перемещений деформирующих заготовку пуансонов и матрицы специализированного гидропресса при изготовлении деталей тира, указанного в заглавии данного пункта. Также оценены соотношения толщин стенок в области прошиваемой полости и размеров фланцев в донной части деталей, которые можно изготовить ХОШ на созданных специализированных прессах.

Деформирование заготовки на специализированном прессе осуществляется следующим образом (рис. 6.34). Исходная заготовка имеет диаметр, равный внешнему диаметру полой части стакана. Пуансон *1* явля-

ется неподвижным на протяжении деформирования заготовки. В позиции а) пуансон 5 и матрица 3 отведены в крайнее нижнее свое положение. В матрицу уложена заготовка, прошедшая предварительную калибровку на отдельном прессе. В позиции б) показано, что матрица с заготовкой, опирающейся на нижний пуансон 5, перемещается в сторону неподвижного пуансона 1. При упоре заготовки в пуансон 1 под действием силы, передаваемой от ползуна пресса пуансоном 5, производится деформирование заготовки, в том числе, закрытая прошивка в ней полости. При этом матрица 3 опережает в своем перемещении деформирующий пуансон 5. Опережающее движение матрицы создает активно направленные напряжения контактного трения на внешней поверхности очага пластической деформации, расположенного под торцом неподвижного пуансона 1. Это способствует протеканию деформирования с уменьшенной величиной давления со стороны пуансона 1 по сравнению с деформированием в матрице, перемещающейся со скоростью, одинаковой со скоростью пуансона 5. Одновременно с созданием активно направленных напряжений контактного трения в результате опережающего движения матрицы открывается радиальная полость со стороны нижнего торца заготовки, и протекает радиальное выдавливание материала заготовки в эту открывающуюся полость. Комбинированное течение металла заготовки одновременно в две полости способствует дополнительной разгрузке пуансона 1 ввиду снижения величины гидростатического давления в расположенном под его торцом очаге пластической деформации.



Рис. 6.34. Последовательность перемещений инструментов, подачи заготовки и удаления изготовленной при штамповке детали на специализированном прессе

После завершения штамповки детали 4 матрица 3 с деталью и пуансоном 5 отводятся в нижнее положение, и в матрицу на верхний торец детали 4 устанавливается новая заготовка, как показано стрелкой в позиции e). В позиции e) показано, что матрица с расположенной в ней деталью 4 и опирающейся на верхний торец этой детали заготовкой поднимается вверх. Заготовка упирается в неподвижный пуансон 1 и в процессе движения матрицы 3 вверх, углубляясь в полость матрицы, выталкивает из матрицы вниз изготовленную деталь 4. Вытолкнутая деталь устройством шиберного типа удаляется из рабочего пространства пресса. После этого матрица с расположенной в ней заготовкой 2 возвращается в положение, изображенное на рис. 6.34 в позиции a). Чтобы заготовка при этом не выпала из матрицы, при предварительной калибровке на отдельном прессе у заготовки обеспечивают внешний диаметр, создающий посадку её в матрице H7/js6.

Для проведения сравнения величин деформирующих сил, при которых производятся штамповка стакана закрытой прошивкой и радиальное выдавливание материала в открывающуюся полость в нижней части заготовки формулы для расчета сил закрытой прошивки взяты из п. 2.2, а для радиального выдавливания фланца в донной части детали – из работы [1]. Слева в каждой из этих формул в качестве выходной величины стоит относительная удельная сила штамповки q. Напомним, что удельная сила, действующая на тот или иной элемент штампового инструмента в процессе его работы, определяется как частное от деления создаваемой прессом деформирующей заготовку силы на площадь сечения этого инструмента в плоскости, перпендикулярной направлению действующей силы. Если рассматривается осуществляющий закрытую прошивку полости в заготовке пуансон, то это площадь поперечного сечения калибрующего пояска пуансона, равная площади сечения прошиваемой полости. Удельная сила имеет такую же размерность, как напряжение, т.е. она измеряется в МПа. При определении относительной удельной силы, это напряжение делится на напряжение текучести материала деформируемой заготовки, также измеряемое в МПа. Поэтому относительная удельная сила – величина безразмерная.

В табл. 58 приведены рассчитанные по формуле из п. 2.2 относительные удельные силы  $q_{\rm cr}$  закрытой прошивки части детали, имеющей форму цилиндрического стакана, в зависимости от обозначенного как R отношения диаметра внешней поверхности стакана D (см. рис. 6.33) к диаметру его полости d. Величины  $q_{\rm cr}$  приведены для штамповки с активно направленными напряжениями контактного трения между матрицей и заготовкой, поскольку, как видно на рис. 6.34, позиция  $\delta$ ) матрица от своего привода (см. рис. 5.32) принудительно перемещается в направлении течения металла заготовки, вытекающего из под торца пуансона в формируемую стенку ста-

кана. Как будет видно в дальнейшем, для сравнения между собой величин сил штамповки стакана закрытой прошивкой и радиального выдавливания фланца в донной части детали требуется пересчитать удельную силу  $q_{\rm cr}$  на площадь с диаметром *D*. Результаты такого пересчета приведены в столбце  $q_{\rm cr}$  табл. 58.

Табл. 58. Относительные удельные силы штамповки стакана закрытой прошивкой

R	$q_{_{ m ct}}$	$q_{ m cr}'$
1,1	3,7	3,06
1,3	3,6	2,13
1,5	3,5	1,56
1,7	3,3	1,14

Обозначения, принятые в работе [1] при анализе радиального выдавливания фланца, приведены на рис. 6.35. На этом рисунке слева от оси изображена схема технологической оснастки перед началом радиального выдавливания заготовки 2, а справа – в конце выдавливания. Выдавливается фланец, имеющий высоту *h* и радиус  $R_{\phi}$ . Значения указанных размеров ниже в табл. 59 приведены в относительных величинах. Их натуральные значения (в мм) отнесены к натуральному значению радиуса контейнера  $r_{\kappa}$ , также имеющему размерность в мм. Поэтому на рис. 6.35 указано, что отнесенное к самому себе значение  $r_{\kappa} = 1$ .



Рис. 6.35. Схема радиального выдавливания заготовки: *1* – опора; *2* – заготовка, *3* – пуансон, *4* – контейнер

Табл. 59. Относительные удельные силы выдавливания фланца

R <sub>φ</sub>	1,2		1,3		1,4		1,5					
h	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
$q_{_{\phi^{_{\pi}}}}$	1,74	1,58	1,52	1,83	1,66	1,61	1,91	1,74	1,69	1,98	1,82	1,76

#### Холодная объемная штамповка полых осесимметричных деталей

При расчете значений, приведенных в табл. 59, принято, что коэффициент контактного трения между заготовкой и контейнером (поз. 4 на рис.6.35), а также заготовкой и опорой (поз. 1 на рис. 6.35) равен 0,1. Высота H, показанная на рис. 6.35, равна 0,5, т.е. половине значения r в относительных координатах. При расчете значений удельных сил  $q_{\phi n}$ , приведенных в табл. 59, высота фланца, имеющего диаметр  $R_{\phi}$  (см. рис. 6.35), принимается равной L - 1 (см. рис. 6.33). Это объясняется тем, что заполнение фланца при радиальном выдавливании происходит на протяжении всей операции, показанной на рис. 6.34,  $\delta$ , и та часть фланца, которая не заполняется в процессе открытия полости.

Поясним роль значений величины  $q_{\rm cr}'$ , приведенных в крайнем правом столбце табл. 58. Согласно схеме на рис. 6.34, формоизменение заготовки при закрытой прошивке начинается с внедрения в заготовку пуансона *1*. При этом, в зависимости от соотношений сил закрытой прошивки полости и радиального выдавливания, будет происходить течение металла в стенку стакана или в полость фланца. При расчете силы штамповки стакана закрытой прошивкой используется значение  $q_{\rm cr}$ , действующее на площади поперечного сечения калибрующего пояска пуансона *1*, см. рис. 6.34. При расчете силы выдавливания фланца создаваемое пуансоном давление  $q_{\rm cr}$  пересчитывается на давление  $q_{\rm cr}'$ , распределенное по площади поперечного сечения контейнера, имеющей радиус  $R_{\rm k}$ . Хотя проводится сравнение полных сил в обоих процессах деформирования заготовки, это эквивалентно сравнению  $q_{\rm cr}'$  с  $q_{\rm hn}$ .

Сравнение данных, приведенных в табл. 58 и табл. 59, показывает, что при R = 1,1 штамповка стакана закрытой прошивкой будет происходить после заполнения фланца вне зависимости от высоты h фланца. При других значениях R в каждом конкретном случае, в зависимости от значения



Рис. 6.36. Дополнительное перемещение матрицы в позиции б, рис. 6.34

 $R_{\phi}$ , вопрос о последовательности заполнения элементов и возможности изготовления детали остается открытым.

При отрицательном результате сравнения данных из табл. 58 и табл. 59 деталь может быть изготовлена при некотором усложнении перемещений матрицы 3, в соответствии с рис. 6.36.

На рис. 6.36 слева показано, что на специализированном прессе, схема которого приведена на рис. 5.32, перемещение матрицы вверх может быть осуществлено на большую величину, чем это требуется из условия обеспечения заданной высоты фланца (см. рис. 6.34,  $\delta$ ). При открытии полости, в которую производится радиальное выдавливание придонного участка заготовки, на большую величину уменьшается давление  $q_{du}$ , значения которого приведены в нижней строке табл. 59. Металл заготовки затекает в открывшуюся полость, как это показано на рис. 6.36, слева. После окончания выдавливания стакана в верхней части заготовки производится опускание показанной, в частности на рис. 5.32, матрицы 5. Отметим, что, согласно конструкции пресса, приведенной на рис. 5.32, сила, создаваемая прессом при опускании траверсы с установленной на ней матрицей, больше, чем сила, создаваемая прессом при подъеме матрицы. Под действием силы, обеспечивающей опускание матрицы при неподвижных пуансонах, происходит оформление фланца детали, как это показано на рис. 6.36, справа. Величина давления, необходимая для оформления фланца меньше, чем при радиальном выдавливании материала заготовки в придонный фланец. Это величина имеет значение, незначительно превышающее напряжение текучести материала заготовки (т.е. это приблизительно 1,1 в сравнении с величинами, приведенными в столбцах табл. 58 и в нижней строке табл. 59).

Для перехода от относительных давлений, значения которых приведены в табл. 58 и табл. 59 и которые являются безразмерными величинами, эти величины умножают на значения напряжения текучести материала деформируемой заготовки. Напряжения текучести определяются по кривым истинных напряжений, которые построены с учетом упрочнения материала, которое характерно для ХОШ. В решении данной практической задачи целесообразно провести иную последовательность расчета.

В работе [3] приведена кривая сопротивления усталости пуансонов, выдавливающих детали типа стаканов. Она характеризует пуансоны, изготовленные с использованием классических технологий из сталей Р6М5, ЭП761 и закаленные на твердость 61...63 HRC. Эта кривая построена авторами настоящей монографии по результатам экспертных оценок, собранных ими на протяжении примерно 45 лет. Согласно этой кривой, обеспечивающей закрытую прошивку полости стакана, пуансон, при обеспечении его работоспособности хотя бы для изготовления 1000 деталей, может выдержать максимальное давление на его торец, равное 2500 МПа. Если разделить это давление на величину относительной удельной силы закрытой прошивки полости, приведенной в табл. 58 (второй абзац для  $q_{\rm ex}$ ), то будет определена величина напряжения текучести материала той заготовки, с прошивкой которой пуансон справится. Если напряжение текучести, определенное по кривой истинных напряжений, превышает это значение, то надо обратиться к специалистам по металловедению и термической обработке металлов с целью нахождения таких режимов термической обработки заданного материала заготовки, при которых будет обеспечена возможность его ХОШ при достаточном сопротивлении усталости пуансонов. Возможно, что эти специалисты порекомендуют использовать нагрев заготовки до температур неполной холодной или даже неполной горячей пластической деформации (по классификации С.И. Губкина) в области температур, граничащей с неполной холодной пластической деформацией.

Таким образом, производство XOШ деталей рассматриваемого в данном пункте типа из коррозионно-стойкой и жаропрочной стали 12X18Н9Т с применением формоизменения заготовки, включающего в себя комбинацию прямого выдавливания стержня с закрытой прошивкой полости стакана, нецелесообразно. При реализации такого технологического процесса на универсальных гидравлических прессах возникают описанные в литературе и обсужденные в настоящем пункте монографии проблемы с конструированием работоспособных штампов, необходимых для указанного формоизменения заготовки.

При применении технологического процесса ХОШ стакана закрытой прошивкой из заготовки с диаметром, равным внешнему диаметру стакана, при активно направленных напряжениях контактного трения и одновременного бокового выдавливания фланца в донной части стакана целесообразно применение специализированного пресса, выпускаемого в России по индивидуальным заказам. При реализации ХОШ стаканов из коррозионно-стойкой и жаропрочной стали с помощью описанного технологического процесса на специализированном прессе требуется проведение дополнительных исследований совместно со специалистами в области металловедения и термической обработки для снижения напряжения текучести заготовок из указанного материала.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная монография позволяет разработчику технологических процессов, основанных на холодной объемной штамповке, определить, сопоставив преимущества таких процессов и трудности их реализации, целесообразность применения холодной объемной штамповки для производства заданных ему конкретных полых деталей.

При возможности выбора материала, из которого изготавливаются детали, анализ при сопоставлении технологических процессов расширяется до сравнения технологии штамповки деталей из сталей, полученных литьем и прокаткой, с технологией производства аналогичных деталей их порошков на железной основе. Монография содержит достаточное количество сведений для проведения такого обоснованного сравнения.

Применение технологии холодной объемной штамповки для рассмотренных в монографии деталей целесообразно, практически всегда, только при условии их крупносерийного и массового производства. Для такого производства проблема рационального выбора технологии решается в совокупности с конструированием штампового и прессового оборудования для реализации выбираемой технологии. Опыт авторов данной монографии показывает, что конструирование и изготовление штампов к универсальному прессовому оборудованию, с учетом стоимости такого оборудования, является менее выгодным, чем разработка и изготовление специализированных гидравлических прессов для штамповки рассматриваемых деталей.

Специализированные прессы, созданные по чертежам, выполненным под руководством авторов данной монографии, представлены в тексте. Это позволит читателю убедиться в справедливости приведенного в предыдущем абзаце утверждения авторов.

В монографии представлены результаты выполненных авторами теоретических исследований, в частности, по определению сил штамповки заготовок, что очень важно для оценки достаточного сопротивления пуансонов их усталостному разрушению и для определения силы пресса. Заметим, что в обработке давлением применяют технологические процессы, в которых, наряду с операциями холодной, используют операции горячей объемной штамповки. Расчет силы пресса для горячей объемной штамповки может быть выполнен по менее точным формулам, чем формулы, приведенные в тексте данной монографии. Это утверждение было разъяснено выше в последнем абзаце 6-го раздела.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковка и штамповка: Справочник. В 4 т. Т. 3. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков; Под ред. А.М. Дмитриева. – 2-е изд., перераб. и доп.; Под общ. ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение. 2010. – 352 с.

2. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение. 1977. –423 с.

3. Наукоемкие технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; Под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение. – 2012; Глава 3. Наукоемкие технологии при производстве заготовок обработкой давлением / В. А. Демин, А. М. Дмитриев, В. Н. Субич, Н. А. Шестаков. – С. 68-114.

4. Пластичность и разрушение/ Под ред. В.Л. Колмогорова. – М.: Металлургия. 1977. – 336 с.

5. Технология конструкционных материалов: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. 6-е изд., испр. и доп. / *А.М. Дальский, Т.М. Барсукова, А.Ф. Вязов, А.М. Дмитриев* и др.; Под общ. ред. А.М. Дальского. М.: Машиностроение. 2005; Раздел 3. Обработка металлов давлением. – С. 59-147.

6. О холодном выдавливании полых цилиндрических изделий из малоуглеродистой стали / В.П. Кузнецов, В.Н. Рогожин, П.И. Татаринов, Е.А. Закуренов // Кузнечно-штамповочное производство. 1972. № 6. – С. 5–8.

7. Эверхард Д. Холодное прессование металлов. Пер. с англ. – М.: Машиностроение. 1968. – 147 с.

8. Джонсон У., Меллор П. Теория пластичности для инженеров. Пер. с англ. А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение. 1979. – 567 с.

9. Овчинников А.Г., Хабаров А.В. Прямое выдавливание цилиндрических стаканов // Совершенствование процессов объемной штамповки: Материалы семинара. МДНТП. – М., 1980. – С. 103–108.

10. Овчинников А.Г., Хабаров А.В. Кинематическое состояние заготовки при выдавливании в коническую полость // Известия вузов. Машиностроение. 1982. № 7. С. 118–122.

11. Особенности напряженно-деформированного состояния и структуры стального полуфабриката при прямом выдавливании с раздачей / *А.В. Хабаров, А.Г. Овчинников, Е.П. Добряков* и др. // Кузнечно-штамповочное производство. 1984. № 11. – С. 21–23.

12. Овчинников А.Г., Хабаров А.В., Волчанинов К.К. Состояние и тенденции развития низкотемпературной штамповки выдавливанием. Обзор. – М.: НИИмаш. 1984. – 72 с.

13. Овчинников А.Г., Хабаров А.В., Добряков Е.П. Штамповка прямым выдавливанием с раздачей // Кузнечно-штамповочное производство. 1985. № 4. – С. 4–6.

14. *Овчинников А.Г., Белоусов В.С.* Напряженно-деформированное состояние заготовки при прямом выдавливании с раздачей стаканов // Известия вузов. Машиностроение. 1986. №9. – С. 103–105.

15. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии заготовительных производств. *Т. Ш-2 / И.Л. Акаро, Р.А. Андриевский, А.Ф Аржанов* и др.; Под общ. ред. В.Ф. Мануйлова. 1996. – 736 с. / П. 3.4.4. Штамповка на гидравлических прессах. – С. 143-148.

16. Патент № 2446909 (РФ). Способ изготовления гильз патронов стрелкового оружия / Ю.И. Гуменюк, Н.В. Спасенко, В.А. Яшкин и др. Опубл. 10.04.2012. Бюл. №10.

17. *Филимонов Ю.Ф., Позняк Л.А.* Штамповка прессованием. М.: Машиностроение. 1964. – 188 с.

18. Головин В.А., Ракошиц Г.С., Навроцкий А.Г. Технология и оборудование холодной штамповки: Учебник для машиностроительных техникумов по специальности «Ковочно-штамповочное производство». – М.: Машиностроение. 1987. – 352 с.

19. Дорофеев Ю.Г., Мариненко Л.Г., Устименко В.И. Конструкционные порошковые материалы и изделия. – М.: Металлургия. 1986. – 144 с.

20. *Радомысельский И.Д., Сердюк Г.Г., Щербань Н.И.* Конструкционные порошковые материалы. Киев: Техніка. 1985. – 152 с.

21. *Новик Ф.С., Арсов Я.Б.* Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение; София: Техника. 1980. – 304 с.

22. *Прозоров Л.В.* Холодное выдавливание тонкостенных изделий // Новые исследования в области кузнечной технологии. ЦНИИТМАШ. Кн. 32. – М.: МАШГИЗ. 1950. – С. 87–96.

23. Холодная объемная штамповка. Справочник / Под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение. 1973. – 496 с.

24. *Овчинников А.Г.* Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. – М.: Машиностроение. 1983. – 200 с. 25. А.с. № 1238877 (СССР). Способ изготовления деталей типа стаканов и устройство для его осуществления / *А.Л. Воронцов*. Опубл. 23.06.86. Бюл. № 23.

26. *Протодьяконов М.М., Тедер Р.И.* Методика рационального планирования экспериментов. – М.: Наука. 1970. – 76 с.

27. *Гуляев А.П., Малинина К.А., Саверина С.М.* Инструментальные стали. – М.: Машиностроение. 1975. – 272 с.

28. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. М.: Металлургия. 1980. – 416 с.

29. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учебник для вузов. В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др. – М.: Металлургия. 1987. – 792 с.

30. Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В. Процессы порошковой металлургии. В 2-х т. Т.1. Производство металлических порошков: Учебник для вузов. – М.: «МИСИС». 2001. – 368 с.

31. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев, А.М. Дмитриев и др. / Под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.

32. Клячко Л.И., Уманский А.М., Бобров В.М. Оборудование и оснастка для формования порошковых материалов. М.: Металлургия. 1986. – 336 с.

33. Сегал В.М., Ганаго О.А., Павлик Д.А. Обработка литых образцов простым сдвигом // Кузнечно-штамповочное производство. 1980. № 2. – С. 7–9.

34. Пластическая обработка металлов простым сдвигом / В.М. Сегал, В.И. Резников, А.Е. Дробышевский, В.Н. Копылов // Металлы. 1981. № 1.– С. 99–105.

35. *Коробова Н.В.* Исследование величин напряжений при уплотнении порошковой заготовки в закрытой матрице // Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. Вып. 1. – С. 65–72.

36. *Коробова Н.В.* Исследование величин накопленных деформаций при измельчении зерен порошковых заготовок осевым сжатием с одновременным прямым выдавливанием // Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. Вып. 2. – С. 113–123.

37. *Коробова Н.В., Дмитриев А.М.* Определение накопленных деформаций при измельчении зерен порошковых заготовок обработкой давлением // Металлообработка. 2008. № 6. – С. 44–49.

38. *Коробова Н.В., Дмитриев А.М.* Производство машиностроительных деталей из порошковых материалов с одновременным измельчением порошка до наноструктурного состояния // Технология легких сплавов. 2009. № 1. – С. 47–52.

39. Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Анализ метода интенсивного пластического деформирования и его применение при исследовании формования

заготовок из железного порошка // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. №9 (723). – С. 53–59.

40. *Dmitriev A.M., Korobova N.V.* Analysis of a Method of Intense Plastic Deformation and Its Application to Molding of Iron Powder Billets // Metal Science and Heat Treatment. Vol. 57. Nos. 9-10. January. 2016. P. 570–575.

41. Mannesmann Demag. Iron and Steel Powders for Sintered Components. – 59 p.

42. *Роман О.В., Габриэлов И.П.* Порошковая металлургия – безотходная, энергосберегающая технология. Минск: Беларусь, 1986. – 160 с.

43. Анциферов В.Н., Пещеренко С.Н., Курилов П.Г. Взаимная диффузия и гомогенизация в порошковых материалах. – М.: Металлургия. 1988. – 152 с.

44. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. – Л.: Машиностроение. 1978. – 368 с.

45. *Петросян Г.Л*. Пластическое деформирование пористых материалов. М.: Металлургия, 1988. – 152 с.

46. Композиционные материалы: Справочник/ Под ред. Д.М. Капиноса. – Киев: Наукова думка. – 592 с.

47. *Радомысельский И.Д.* Исследование величины коэффициента бокового давления при прессовании порошков // Порошковая металлургия. 1966. № 9. – С.107-110.

48. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те. 1987. – 144 с.

49. Конструкции штампов для холодной объемной штамповки на универсальных прессах / В.В. Евстифеев, В.П. Кокоулин, В.М. Колесников и др. // Кузнечно-штамповочное производство. 1978. № 4. – С. 17-20.

50. *Панфилов Ю.В., Беликов А.И.* Тонкопленочные антифрикционные покрытия на основе MoS2 // Труды постоянно действующего научно-технического семинара «Электровакуумная техника и технология». Т. 2 (за 1999–2002 гг.). – М., 2003. – С. 72–79.

51. *Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С., Крымов В.В.* Авиационное материаловедение и технологии обработки металлов: Учебное пособие для авиационных вузов. Под ред. Н.В. Абраимова. М.: Высшая школа, 1998. – 444 с.

52. *Huang T.H., Jiang C.P., Grechnikov F.V.* Effect of grain size on mechanical revolution of pure titanium and die cavity filling rate in hot squeezing mini spurgear forming process / // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2017. Vol.18. Iss. 10. – P.1371–1377.

53. Машиностроение. Энциклопедия . Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Машины и оборудование кузнечно-штамповочного и литейного производства. Т. IV-4/*Ю.А. Бочаров, И.В. Матвеенко* и др. : Под общ. ред. Ю.А. Бочарова, И.В. Матвеенко. 2005. – 926 с. Пункт 2.10.2. Специализированные прессы. – С. 175–180.

54. Данилин Г.А., Огородников В.П. Теория и расчеты процессов комбинированного пластического формоизменения. – СПб: Балт. гос. техн. ун-т. 2004. – 304 с.

55. Новожилов В.В. О пластическом разрыхлении // Прикладная математика и механика. 1985. Т. 29. – С. 33–35.

56. Жвик И.М., Шаров А.С. Повышение точности и степени деформации при вытяжке с утонением // Кузнечно-штамповочное производство. 1975. № 2. – С. 20-21.

57. Наука и технологии. Серия: Технологии и машины обработки давлением. Избранные труды Российской школы. – М.: Российская академия наук, 2005. – 204 с.; *Дмитриев А.М., Воронцов А.Л.* Определение технологических параметров вытяжки с утонением стенки. – С. 18–29.

58. Осадчий В.Я., Воронцов А.Л., Безносиков И.И. Теория и расчеты технологических параметров штамповки выдавливанием. Учебное пособие для вузов с грифом Минобразования РФ. М.: МГАПИ. 2001. – 307 с.

59. Потапов И.Н., Коликов А.П., Друян В.М. Теория трубного производства. – М.: Металлургия. 1991. – 424 с.

60. Обработка цветных металлов и сплавов давлением / Богоявленский К.Н., Жолобов В.В., Лангихов А.Д., Постников Н.Н. – М.: Металлургиздат. 1973. – 471 с.

61. Попов Е.А., Ковалёв В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2000. – 480 с.

62. Шофман Л.А. Теория и расчёты процессов холодной штамповки. – М.: Машиностроение. 1964. – 375 с.

63. *Фельдман Г.Д.* Холодное выдавливание стальных деталей: Перевод с немецкого. Москва: МАШГИЗ, 1963. – 188 с.

64. *Сулиман М., Мусса Г., Коробова Н.В.* Точность размеров оболочек при холодном выдавливании на трехвалковых ротационных машинах // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2000. № 7. – С. 21–23.

65. Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Петров М.Д. Разработка технологии производства корпуса гидроцилиндра из железного порошка // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. № 1 (28). – С. 54–58.

66. Ковка и штамповка: Справочник. В 4 т. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. – 2-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение. 2010. – 717 с.

67. Семенов Е.И., Овчинников А.Г., Дмитриев А.М. Исследование процесса обратного выдавливания // Известия Высших учебных заведений. Машиностроение. 1975. №12. С. 121–126. 68. Дмитриев А.М., Воронцов А.Л. Общая теория осадки и высадки сплошной цилиндрической заготовки. Часть II. Высадка // Вестник МГТУ им. Баумана. 2004. № 4 (57). С. 57–77.

69. *Белевич А.В.* Моделирование показателей пластичности и сопротивления деформации сталей и сплавов: практикум по технологической механике / Владимир. гос. ун-т. – Влидимир: Изд-во ВлГУ. 2005. – 84 с.

70. Справочник по машиностроительным материалам. В 4 т. Т.2. Цветные металлы и сплавы. Под ред. М.А. Бочвара / Под общ. ред. Г.И. Погодина-Алексеева. М.: МАШГИЗ. 1959. – 639 с.

71. Ковка и штамповка цветных металлов:справочник.М.: Машиностроение. 1971. – 232 с.

72. Дмитриев А.М., Воронцов А.Л., Абрамов Е.А. Комбинированное выдавливание полых цилиндрических изделий со сферическим дном // Металлообработка. 2002. № 3 (9). С. 22–24.

73. Дмитриев А.М., Воронцов А.Л. Определение технологических параметров выдавливания трубных изделий // Производство проката. 2003. № 8. С. 34–41.

А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова

# ХОЛОДНАЯ ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА ПОЛЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Формат 70x100 1/16 Гарнитура Times Усл.-п. л. 28,93. Уч.-изд. л. 19,56 Тираж 300 экз.

Издатель – Российская академия наук

Публикуется в авторской редакции

Верстка и печать – УНИД РАН Отпечатано в экспериментальной цифровой типографии РАН

Издается по решению Научно-издательского совета Российской академии наук (НИСО РАН) от 31.03.2023 г. и распространяется бесплатно