МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

А.М. ДМИТРИЕВ, Ф.В. ГРЕЧНИКОВ, Н.В. КОРОБОВА

КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
Часть 1
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ПРЕССЫ ДЛЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Рекомендовано редакционно-издательским советом
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический
университет имени С.П. Королева (национальный исследовательский университет)»
в качестве учебника для студентов, обучающихся по программе высшего
профессионального образования по специальности
«Машины и технология обработки металлов давлением»

С А М А Р А
Издательство СГАУ
2012

УДК 621.987(075)
ББК 34.623
Д 534

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В. П. С т у п н и к о в,
д-р техн. наук, проф. Е. Н. С о с е н у ш к и н

Дмитриев А.М.

Д 534 **Кузнечно-штмповочное оборудование. Ч. 1. Специализированные прессы для инновационных процессов обработки материалов давлением**: учеб. для вузов / *А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова.* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012.- 165 с.

ISBN 978-5-7883-0903-3

Обосновано, что для усиления конкурентоспособности современного отечественного кузнечно-прессового оборудования на международном уровне целесообразно сосредоточить силы на выпуске специализированных прессов, в создании которых у авторов накоплен многолетний потенциал.

Приведены сведения об инновационных проектах в области листовой штамповки, штамповки выдавливанием в разъемные матрицы, производства деталей из металлических порошков. Кратко рассмотрено современное состояние нанотехнологий. Показана перспективность применения рассмотренных специальных методов штамповки.

Описаны образцы разработанных и используемых в производстве специализированных прессов, предназначенных для реализации описанных специальных методов штамповки. Приведены примеры машиностроительных деталей, изготовленных на разработанных специализированных гидропрессах. Изложена теория расчета величин накопленных деформаций при обработке на специализированных прессах порошковых заготовок с целью достижения наноструктуры изделий.

Для инженерно-технических работников, студентов и преподавателей вузов, специализирующихся в кузнечно-штамповочном производстве.

УДК 621.987(075)
ББК 34.623

ISBN 978-5-7883-0903-3

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ..... 5

1. ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРЕССОВ ДЛЯ ВЫТЯЖКИ ДЕТАЛЕЙ ПУЛЕОБРАЗНОЙ ФОРМЫ ИЗ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК..... 13

2. ПРЕСС ДЛЯ ДВУХСТОРОННЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОКОВОК ДЕТАЛЕЙ С БОКОВЫМИ ОТРОСТКАМИ В РАЗЪЕМНЫЕ МАТРИЦЫ..... 21

3. МАЛОГАБАРИТНЫЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРЕССЫ..... 31

3.1. Расширение области применения холодной объемной штамповки выдавливанием с активными силами трения..... 31

3.2. Штамповка композиционных материалов..... 44

3.3. Производство высококачественных деталей из порошковых сталей.. 59

3.4. Формование конических втулок..... 65

3.5. Производство длинномерных (прутковых) изделий из металлического порошка..... 67

3.6. Формование высокоплотных порошковых деталей на прессах, создающих активные силы контактного трения..... 71

3.7. Производство нанопорошковых заготовок..... 77

4. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ..... 79

4.1. Штамповка в гидростатах..... 79

4.1.1. Цель создания и конструкции гидростатов..... 79

4.1.2. Требования к деталям гидростатов и конструктивное исполнение этих деталей..... 85

4.2. Газостатическая обработка заготовок..... 95

4.3. Штамповка деталей из трубных заготовок..... 98

4.4. Штамповка обкатыванием..... 101

4.5. Штамповка с раскаткой..... 114

4.6. Импульсные методы штамповки..... 116

4.7. Навивка пружин на автоматах..... 127

4.8. Изготовление отрезкой от прутка цилиндрических заготовок высокой точности..... 132

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМИРУЮЩИХ СИЛ И НАКОПЛЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ОПЕРАЦИЯХ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЗАГОТОВОК С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗРАБОТАННЫХ ПРЕССОВ..... 135

5.1. Определение условного напряжения текучести порошковой заготовки..... 137

5.2. Исследование величин напряжений при уплотнении порошковой заготовки в закрытой матрице..... 143

5.3. Исследование величин накопленных деформаций
при измельчении зерен порошковых заготовок осевым сжатием
с одновременным прямым выдавливанием..... 149
5.4. Исследование величин накопленных деформаций
при измельчении зерен порошковых заготовок осевым сжатием
с одновременным радиальным выдавливанием..... 155

ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... 159

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ..... 160

ВВЕДЕНИЕ

Авторы настоящего учебника на протяжении многих лет своей научной и инженерной деятельности занимаются созданием специализированного прессового оборудования. В этом направлении они не являются пионерами. Данное направление в МГТУ им. Н.Э. Баумана развил заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, доктор технических наук, профессор А.Г. Овчинников.

Специализированные прессы характеризуются тем, что они создаются для массового или крупносерийного производства одного изделия или нескольких однотипных изделий в течение всего срока своей службы. В этом случае появляется возможность отказаться в их конструкции от ряда элементов, присутствующих у универсальных прессов, а в конструкцию специализированных прессов добавить элементы, позволяющие реализовать на них наиболее рациональное с позиций сокращения энергозатрат, повышения качества изделий и производительности труда нагружение штампуемой заготовки.

В принципе, к специализированным прессам можно отнести холодноштамповочные автоматы и некоторые другие типы прессов, серийно выпускаемых на специализированных прессостроительных предприятиях.

Если говорить об автоматах, то они в своей технологической направленности сориентированы на последовательную многопереходную штамповку с заведомо заниженным по отношению к предельно допустимому формоизменению заготовки за один переход.

В данном учебнике речь идет о процессах деформирования заготовок за минимальное количество переходов и повышении предельно допустимого формоизменения за переход благодаря специальным способам деформирования заготовки.

В период индустриализации нашей страны сформировалось справедливое в те годы представление, что нашу машиностроительную промышленность необходимо насытить универсальным технологическим оборудованием. Таким оборудованием, которое позволяло бы выпускать широкую номенклатуру изделий. Для каждого из изделий технологи создавали штампы и таким образом реализовывали процессы штамповки для производства конкретных поковок.

Указанный подход в своем развитии привел к тому, что в 60-е годы в нашей стране был осуществлен выпуск двух крупнейших в мире универсальных гидравлических прессов силой 75 тысяч тонн (750 МН). Главным конструктором проекта являлся выпускник кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением» МВТУ им. Н.Э. Баумана доктор технических наук, про-

фессор Б.В. Розанов. Несколько позже под его руководством был разработан проект гидравлического пресса силой 65 тысяч тонн по заказу Франции для французской авиационной промышленности. При этом Советский Союз выиграл конкурс на создание этого пресса у США, ФРГ, Японии, Италии. Пресс был построен на Новокраматорском машиностроительном заводе.

Надо ли было создавать такие крупнейшие в мире прессы? Да, надо. Почему же такие огромные прессы не строили капиталистические страны? По нашему мнению, только пятилетнее планирование развития народного хозяйства в Советском Союзе позволяло сосредоточить средства для реализации таких проектов. В капиталистических странах отдельным прессостроительным фирмам это было не по силам.

После перехода на рыночные методы хозяйствования и разгосударствления машиностроительного производства создание такого тяжелого кузнечно-прессового оборудования отдельным предприятиям стало не по силам. Однако у нас остался большой, не реализованный в период так называемого «застоя» инновационный потенциал. В настоящее время целесообразно воспользоваться накопленным ранее в нашей стране потенциалом в области создания нового кузнечно-прессового оборудования. Более того, мировой финансовый кризис подвигает сегодняшних ученых-конструкторов не только к использованию этого потенциала, но и к возрождению уже несколько утраченных методов подготовки специалистов-конструкторов, о котором будет сказано немного ниже.

При подготовке специалистов необходимо учесть и существовавший в советский период фактор специализации предприятий и жесткого планирования их деятельности сверху. Тогда кузнечно-прессовое оборудование выпускали специализированные прессостроительные заводы. Такие заводы были заинтересованы в выпуске преимущественно крупного универсального оборудования. Об этом свидетельствуют номенклатурные каталоги выпускаемой продукции этих предприятий.

Предполагалось, что у потребителя на прессе с большим запасом по силе и установочной мощности (при необходимости) можно изготовить мелкие штампованные изделия, если установить соответствующие штампы.

Однако опыт Оренбургского завода гидропрессов, выпустившего в конце 80-х годов партию прессов силой 50 кН, подтвердил целесообразность создания мелких прессов. Эти прессы вызвали активный спрос потребителей, и обладатели этих прессов успешно эксплуатируют их и в настоящее время.

При использовании крупных универсальных прессов для штамповки мелких деталей предъявляются повышенные требования к жесткости штампов. Направляющие ползуна крупного пресса невозможно отрегулировать с точно-

стью, требуемой при производстве мелких поковок. Необходимую точность приходится обеспечивать за счет направляющих элементов штампов. Последние должны компенсировать перекосы и смещения ползуна крупного пресса, чтобы не допустить поломки деформирующего заготовку инструмента, т.е. создавая дополнительные сложности.

Создание новых видов прессового оборудования неразрывно связано с подготовкой специалистов: конструкторов и технологов. Один из основоположников прикладной науки по машинам и технологии обработки металлов давлением доктор технических наук, профессор А.И. Зимин создал систему, при которой одновременно развивались новые научные направления и производились прикладные разработки, а также готовились высококвалифицированные научные кадры.

Согласно этой системе разработка новых прототипов и конструкций кузнечно-штамповочных машин (КШМ) осуществлялась планомерно.

Алгоритм этих работ в системе Министерства образования и науки включал в себя следующие этапы: принципиальная схема машины, расчеты, студенческие курсовые и дипломные проекты, эскизно-технический проект конструкции, рабочий проект, изготовление экспериментального прототипа, образца, сборка и отладка, экспериментальные исследования, сопровождающиеся глубокими разработками теории и методов расчета. Все эти работы предусматривают успешную защиту курсовых и дипломных проектов, кандидатских диссертаций.

Благодаря разработанной А.И. Зиминым системе в относительно короткий период были разработаны и исследованы конструкции следующих кузнечно-штамповочных машин.

Гидровинтовые пресс-молоты

Новые конструкции гидровинтовых пресс-молотов создавались с объединением трех видов энергии: кинетической энергии поступательного движения, вращательного движения и энергии давления.

- С наружной резьбой винтового цилиндра: Бочаровым Ю.А.
- С внутренней резьбой винтового цилиндра: Мороговым В.М.
- Гидровинтовой кривошипный пресс: Гужиным С.С.
- Гидровинтовой коленный пресс: Артемовым Ю.М.
- Гидровинтовой скоростной пресс-молот: Ларионовым А.М.
- Специализированный скоростной пресс-молот: Сафоновым А.В.
- Гидровинтовой бесшаботный пресс-молот: Брежневым М.Т.
- Гидровинтовой импульсный бесшаботный пресс-молот: Фофлиным Ю.А.
- Гидровинтовой импульсный пресс-молот: Соколовым А.Ф.

- Гидровинтовой пресс с гидромоторным приводом: Ларионовым Н.М.

Гидроимпульсные пресс-молоты

- Гидроимпульсный пресс-молот: Кагармановым А.Ф.
- Гидроимпульсный пресс-молот: Бердниковым Э.Б.

Гидравлические и гидропневматические молоты

- Штамповочный гидромолот: Хорычевым А.А.
- Гидравлический молот: Лукашиным В.И.
- Гидропневматический молот: Погаловым А.И.
- Гидропневматический молот: Бабиным Н.Б.
- Гидропневматические молоты: Колотовым Ю.В.

Каждое исследование заканчивалось методиками проектного и аналитического расчета новой машины и рекомендациями по ее внедрению, применению в промышленности.

Дальнейшей разработкой КШМ является создание системы дозирования энергии, числового программного и программно-адаптивного их управления.

На современном уровне это означает, что КШМ должны быть оборудованы системами программного и программно-адаптивного управления, мониторинга и диагностики параметров на основе электроники, компьютерной техники, информационных технологий.

В МГТУ им. Баумана разработаны и исследованы следующие системы:

- Система дозирования энергии электровинтового пресса.
- Система управления гидровинтового пресса.
- Система адаптивного (по температуре заготовки) управления гидровинтового пресса с горизонтально-встречным движением ползунов.
- Система программно-адаптивного (по массе и температуре заготовки) управления гидровинтовых прессов на основе имитационной модели.
- Система программного управления приводных пневматических молотов.
- Система программного управления ковочных комплексов с обратной связью по высоте поковки.
- Система программного управления паровоздушным штамповочным молотом.
- Система адаптивного (по параметрам энергоносителя) управления для паровоздушных штамповочных молотов.
- Система программного управления для винтовых муфтовых прессов.

- Система программного управления для гидровибрационных прессов.
- Система программно-адаптивного (по массе и температуре заготовки) управления для гидропневматических молотов серии МШ.
- Система программно-адаптивного (по высоте поковки) управления для гидропневматических штамповочных молотов.
- Система программно-адаптивного (по массе и температуре заготовки) управления для кривошипных горячештамповочных прессов и комплексов.

Наряду с энергетическими показателями создаваемого нового оборудования для прессов характерны их технологические показатели. Они заключаются в реализации наиболее перспективных технологических процессов и выполнении штамповки высококачественных деталей, имеющих заданную прочность, волокнистую структуру или наноструктуру и т.п. Для реализации таких технологических процессов часто необходимо осуществлять перемещение нескольких деформирующих заготовку инструментов при специально задаваемом маршруте перемещения каждого инструмента.

Если дополнительные устройства для реализации таких перемещений инструментов встраивать в штампы для универсальных прессов, эти штампы будут иметь большие габариты. Для размещения таких штампов на универсальных прессах придется выбирать прессы не по величине номинальной деформирующей силы, а по размерам увеличенного штампового пространства. Выбор универсальных прессов по величине штампового пространства приведет к многократному превышению силы пресса и мощности его привода, а также собственной массы пресса по сравнению с теми силами и мощностями, которые нужны для осуществления выполняемой технологической операции.

Конструкция специализированного пресса может быть принципиально упрощена по сравнению с конструкцией универсального пресса. Габариты и масса специализированного пресса являются минимально необходимыми для реализации его технологического назначения. Более того, трудоемкость изготовления специализированного пресса становится близка к трудоемкости изготовления и стоимости штампа для универсального пресса. Такой пресс может изготовить предприятие, на котором он будет потом эксплуатироваться.

Одновременно с конструированием прессов в том виде, как их воспринимают традиционно, на кафедре МГТУ им. Н.Э. Баумана развивалось научное направление и связанная с ним система подготовки специалистов по разработке технологических процессов производства машиностроительных деталей из создаваемых одновременно с изготовлением деталей новых композиционных материалов и, вместе с этим, – по конструированию и созданию нового технологического оборудования для реализации этих технологических про-

цессов. Для этого направления характерно использование в создаваемом оборудовании новых видов энергий (магнитно-импульсных полей), обеспечивающих требуемые свойства деталей.

Описываемое научное направление зародилось в 1979 г. под руководством выдающегося ученого доктора технических наук, профессора Е.А. Попова.

В эти же годы профессор А.М. Дмитриев начал разработку технологий производства деталей машиностроения из порошков на железной основе и конструкций специализированных прессов, необходимых для реализации этих технологий.

В отраслевой лаборатории создавались новые материалы, которые в настоящее время принято называть наноматериалами. У этих материалов соотношение объема и поверхности отдельных частиц существенно отличается от соответствующего соотношения у традиционных материалов, и в силу этого отличия наноматериалы обладают специфическими свойствами, в частности, физическими. Когда речь идет об отдельных частицах, то материал порошковый.

В основу работы с порошковыми материалами было положено условие, что материал предназначен для изготовления из него заданных деталей машиностроения. Если материал создается непосредственно в процессе изготовления из него машиностроительной детали, то достигнутые при этом служебные свойства будут выше, чем при раздельном изготовлении материала и потом из него – детали или другого изделия.

Для изготовления деталей из непосредственно создаваемого для них порошкового материала требовались специализированные прессы.

В разрабатываемых технологических процессах стали активно использовать технологии магнитно-импульсной штамповки. Обобщив эти разработки, заведующий отраслевой лабораторией Л.Т. Буравлев в 1986 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка научных основ магнитно-импульсного разрушения конгломератов ферропорошков. Пути повышения эксплуатационных характеристик магнитожидкостных уплотнений и муфт».

Дальнейшее развитие и научное обоснование технологий производства деталей машиностроения из порошковых материалов связано с развитием метода создания активных сил контактного трения в операциях штамповки выдавливанием, для реализации которого потребовалась модернизация прессов.

Суть метода состоит в том, что отдельные элементы штампа перемещаются в процессе деформирования заготовки со скоростями, превышающими скорость течения материала заготовки. В результате силы контактного трения с инструментом становятся активными, способствующими формоизменению

заготовки и снижению удельных сил деформирования в наиболее нагруженных частях инструмента. Стало возможным изготовление деталей из сплавов, при деформации которых по традиционным схемам не обеспечивалась удовлетворительная стойкость штампового инструмента.

Как показали исследования, проведенные профессором А.М. Дмитриевым и его сотрудниками и учениками применительно к порошковым материалам, можно расширить технологическое назначение прессов для выдавливания с активными силами контактного трения. При производстве деталей из порошковых материалов перемещение рабочих частей прессов используется для создания интенсивных сдвигов слоев порошковой заготовки, приводящих к измельчению порошка и повышению плотности изготавливаемой порошковой детали. Измельчение может производиться до достижения микроструктур и даже наноструктур порошковых материалов, из которых изготавливаются машиностроительные детали.

Результаты этих работ научной школы А.М. Дмитриева отражены в целом ряде кандидатских и следующих докторских диссертациях:

В.П. Ступниковым защищена докторская диссертация «Разработка технологии повышения качества изделий из компактных и порошковых материалов обработкой давлением с использованием импульсного магнитного поля».

Н.В. Коробовой защищена докторская диссертация «Научное обоснование и реализация технологических решений для производства высокоплотных заготовок из металлических порошков обработкой давлением на прессах».

С кафедрой обработки металлов давлением СГАУ им. академика С.П. Королева, возглавляемой членом-корреспондентом РАН, профессором Ф.В. Гречниковым, у родственной кафедры МГТУ им. Н.Э. Баумана тесное и плодотворное сотрудничество длится уже более 45 лет. В рамках этого сотрудничества проведены исследования, разработаны и внедрены технологии создания высокотекстурированных материалов и их последующего формообразования, обеспечивающие заданные физико-механические свойства изготавливаемых из них машиностроительных деталей.

Профессором Ф.В. Гречниковым в 1993 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана защищена докторская диссертация, ориентированная на интенсификацию процессов листовой штамповки деталей в основном для авиастроительной промышленности.

Как было указано выше, для создания новых физических свойств деталей авиастроения потребовалась существенная модернизация производственного оборудования и доведение этого оборудования до уровня специализированного.

При создании малогабаритного пресса его во многих случаях целесообразно разрабатывать для изготовления определенной детали или группы деталей. При этом возможно вообще отказаться от штампа и даже ползуна пресса, как это будет показано ниже. Габариты вновь создаваемого пресса и трудоемкость его изготовления становятся близки к трудоемкости изготовления и стоимости штампа для универсального пресса.

На основании сказанного создание и использование специализированных прессов актуально для современного состояния нашего возрождающегося машиностроения. Как следствие, достигается большое сокращение энергозатрат в производстве, установочной мощности и металлоемкости оборудования. Появляется возможность устанавливать и эксплуатировать специализированные прессы на верхних этажах зданий.

Некоторые типы разработанных авторами специализированных прессов для выполняемых на них специальных технологических процессов описаны в предлагаемом издании.

1. ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРЕССОВ ДЛЯ ВЫТЯЖКИ ДЕТАЛЕЙ ПУЛЕОБРАЗНОЙ ФОРМЫ ИЗ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

Рассматривается вытяжка деталей, имеющих значительный конический придонный участок, переходящий в цилиндрический участок (рис. 1).

Деталь с таким большим, как показано на рисунке, отношением высоты к диаметру конической части оснастки невозможно получить из плоской заготовки за один переход. Это определяется предельной величиной коэффициента вытяжки, поэтому вытяжку проводят за несколько переходов. При традиционной многопереходной вытяжке на первом переходе из плоской заготовки вытягивают цилиндрический стакан; на последующих переходах проводят вытяжку стаканов, имеющих меньший диаметр и большую высоту, из цилиндрических стаканов, вытянутых на предыдущих переходах. Однако в данном случае требуется изготовление детали, имеющей конический участок большой длины. Это приводит при традиционных способах штамповки к увеличению количества переходов, т.е. формоизменяющих операций, необходимых для получения детали заданной формы. При вытяжке конических деталей количество переходов определяется не только предельным коэффициентом вытяжки, но и потерей устойчивости заготовки.

Потеря устойчивости проявляется в виде тангенциально расположенных складок, образующихся в зазоре между коническим пуансоном и цилиндрической матрицей. Это связано с тем, что на начальном этапе участок заготовки, находящийся вне контакта с пуансоном и матрицей, имеет значительную протяженность. В начале деформирования на этом переходе пуансон воздействует только на центральную зону донной части заготовки. По мере продвижения пуансона дно заготовки прогибается, одновременно увеличивается ширина зоны контакта с матрицей, причем внутренняя поверхность заготовки постепенно приближается к поверхности пуансона.

Складки образуются на начальном этапе каждого из переходов вытяжки элемента конической части детали, когда зазор между торцевой частью конического пуансона и поверхностью матрицы значительно превышает величину, являющуюся рациональной величиной зазора при последовательной вытяжке.

В тех случаях, когда при вытяжке наблюдается значительная потеря устойчивости, конический участок детали изготовляют за несколько переходов [41]. За каждый переход вытягивают небольшую часть конического участка. При этом может потребоваться несколько дополнительных переходов по сравнению с их количеством, которое определялось бы предельной величиной коэффициента вытяжки. Недостатком вытяжки с применением описанного

способа, помимо дополнительных операций, является образование на конической поверхности детали окружных рисок, связанных с началом каждой последующей операции вытяжки конуса.

Отметим, что образование складок при вытяжке конического стакана из предварительно вытянутого цилиндрического меньше, чем образование складок, которое иногда наблюдается во фланце плоской заготовки на первом переходе вытяжки. Это объясняется тем, что при вытяжке стакана меньшего диаметра из заготовки в виде стакана большего диаметра часть заготовки, находящейся в зазоре между пуансоном и матрицей, на промежуточных стадиях деформирования заключена между донной и цилиндрической частями деформируемого стакана, в которых потери устойчивости не происходит.

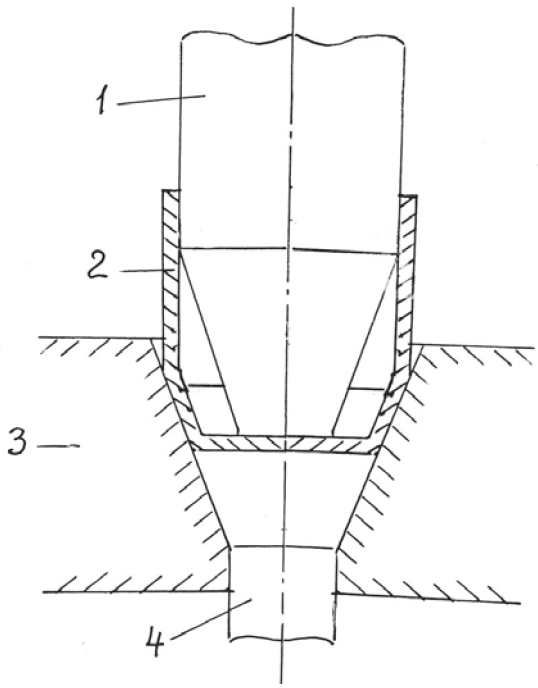


Рис. 1. Схема вытяжки детали пулеобразной формы: *1* – пуансон, *2* – заготовка, *3* – матрица, *4* – выталкиватель

Образующая заготовки в зазоре между пуансоном и матрицей непрямолинейна, поэтому втяжку таких деталей осуществляют в так называемую глухую матрицу, чтобы на последнем этапе деформирования достичь прямолинейности образующей путем правки заготовки между коническими поверхностями пуансона и матрицы.

Чтобы исключить описанные трудности, авторами разработан способ вытяжки через вальцы (рис. 2) и конструкция устройства для его осуществления.

При вытяжке по разработанному способу на первом этапе вальцы совершают движение в направлении, показанном на рис. 2, *а* стрелками ω и $M_{кр}$. В

то же время пуансон может совершать незначительное движение назад, оказывая сопротивление, величина которого ($P_{\text{сопрот}}$) достаточна для того, чтобы происходило формоизменение заготовки. На втором этапе пуансон движется вниз, проталкивая заготовку через вальцы, которые поворачиваются по стрелке ω на рис. 2, *б* в направлении, противоположном направлению поворота на первом этапе, при этом вальцы оказывают сопротивление, величина которого ($M_{\text{с}}$) достаточна для формоизменения заготовки.

Необходимость в двухэтапном деформировании вызвана следующим обстоятельством. Предположим, что нет первого этапа, и заготовку, имеющую дно с диаметром, незначительно меньшим диаметра ее цилиндрической части, устанавливают в вальцы. При этом вальцы развернуты так, что диаметр образованного ими отверстия соответствует наименьшему диаметру детали. Если в таком положении инструмента проводить вытяжку проталкиванием заготовки через образованную вальцами полость матрицы, острые кромки фильеры вальцов врезаются в дно заготовки, что приводит к браку.

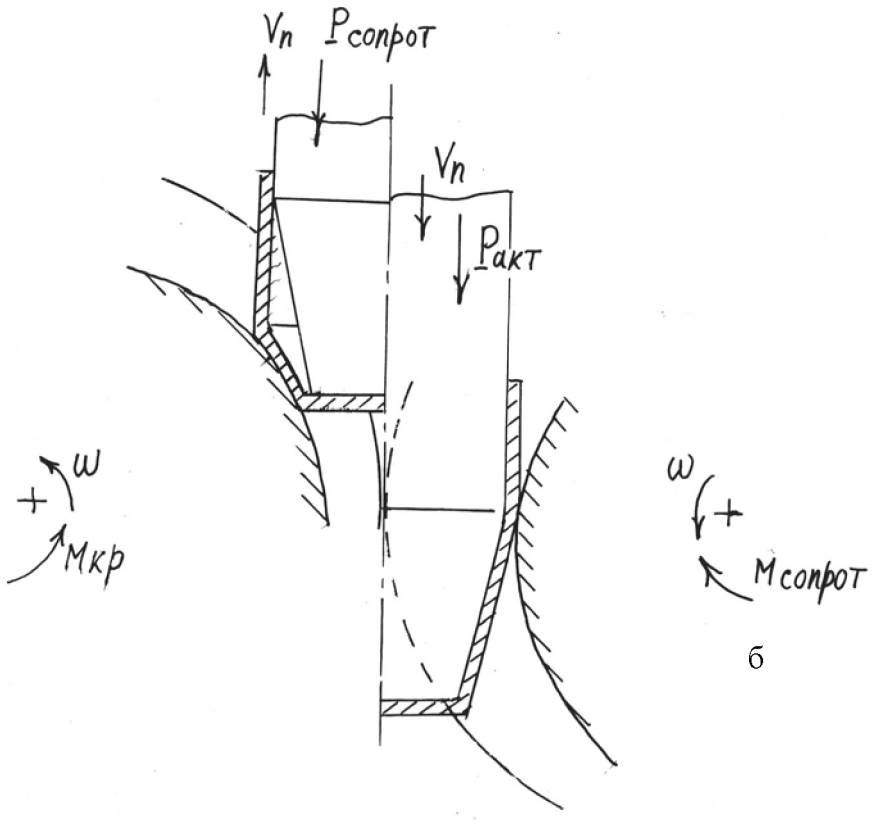


Рис. 2. Схема вытяжки рассматриваемой детали через вальцы

Для осуществления вытяжки конических деталей в матрице с непрерывно расширяющейся полостью разработана конструкция опытно-промышленного штампа, показанная на рис. 3.

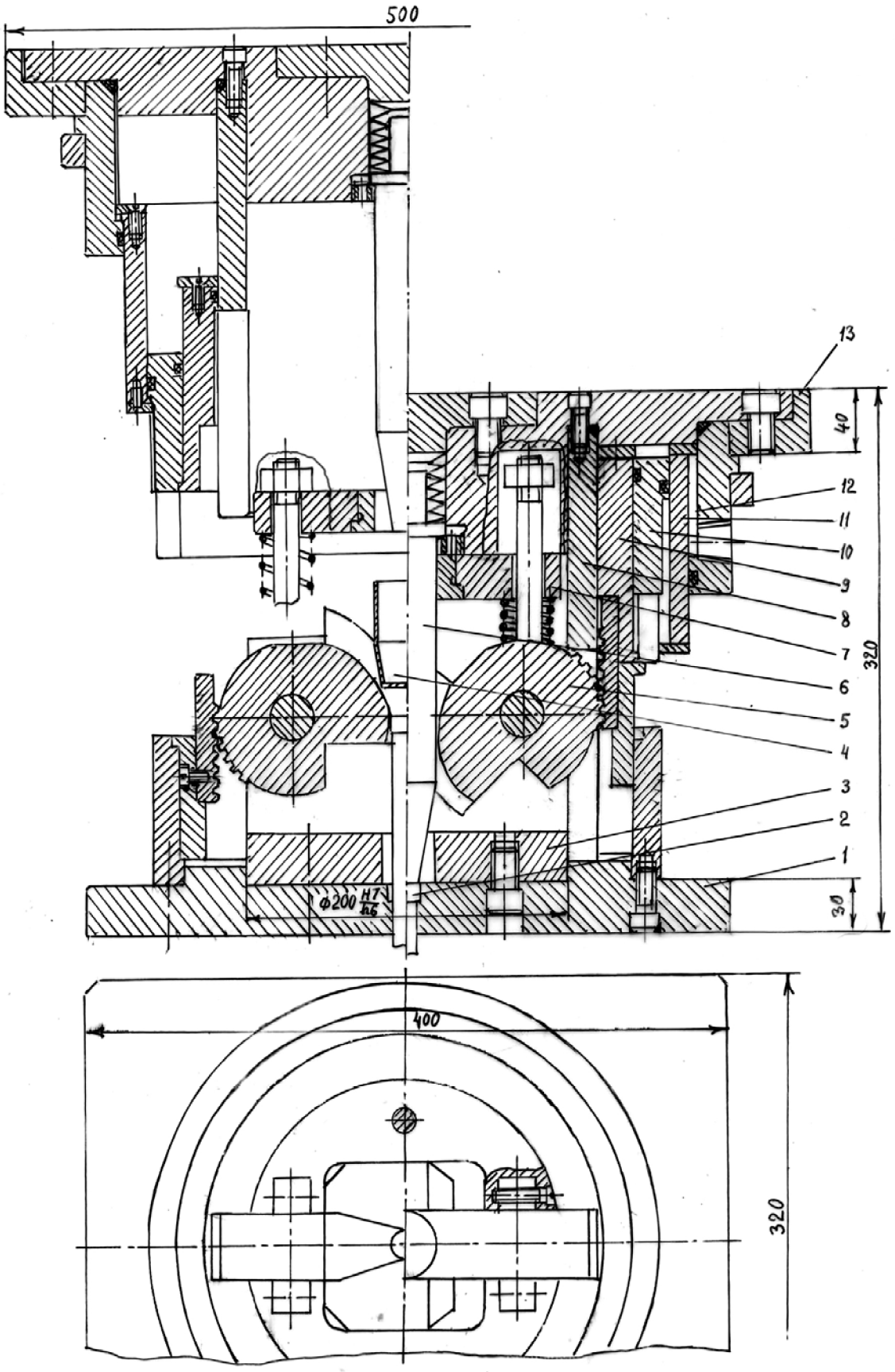


Рис. 3. Конструкция штампа для вытяжки в вальцах

Особенностью штампа является выполнение матрицы в виде двух соответствующим образом спрофилированных вальцов. Профиль матрицы (вальцов) таков, что при прохождении через нее конического пуансона диаметр матрицы (полости, образованной вальцами) в каждый момент вытяжки равен диаметру пуансона в сечении его плоскостью, проходящей через оси вальцов, плюс двойная толщина стенки вытягиваемой детали.

В процессе вытяжки под действием пуансона, продвигающего и одновременно формоизменяющего в матрице (вальцах) заготовку, вальцы поворачиваются таким образом, чтобы каждому положению пуансона соответствовал определенный участок их рабочего профиля.

Для формоизменения заготовки необходимо, чтобы матрица описанной конструкции изменяла свой профиль с достаточным давлением на заготовку. С этой целью в показанном на рис. 3 штампе предусмотрено специальное устройство, создающее такое давление на заготовку путем создания сопротивления повороту вальцов.

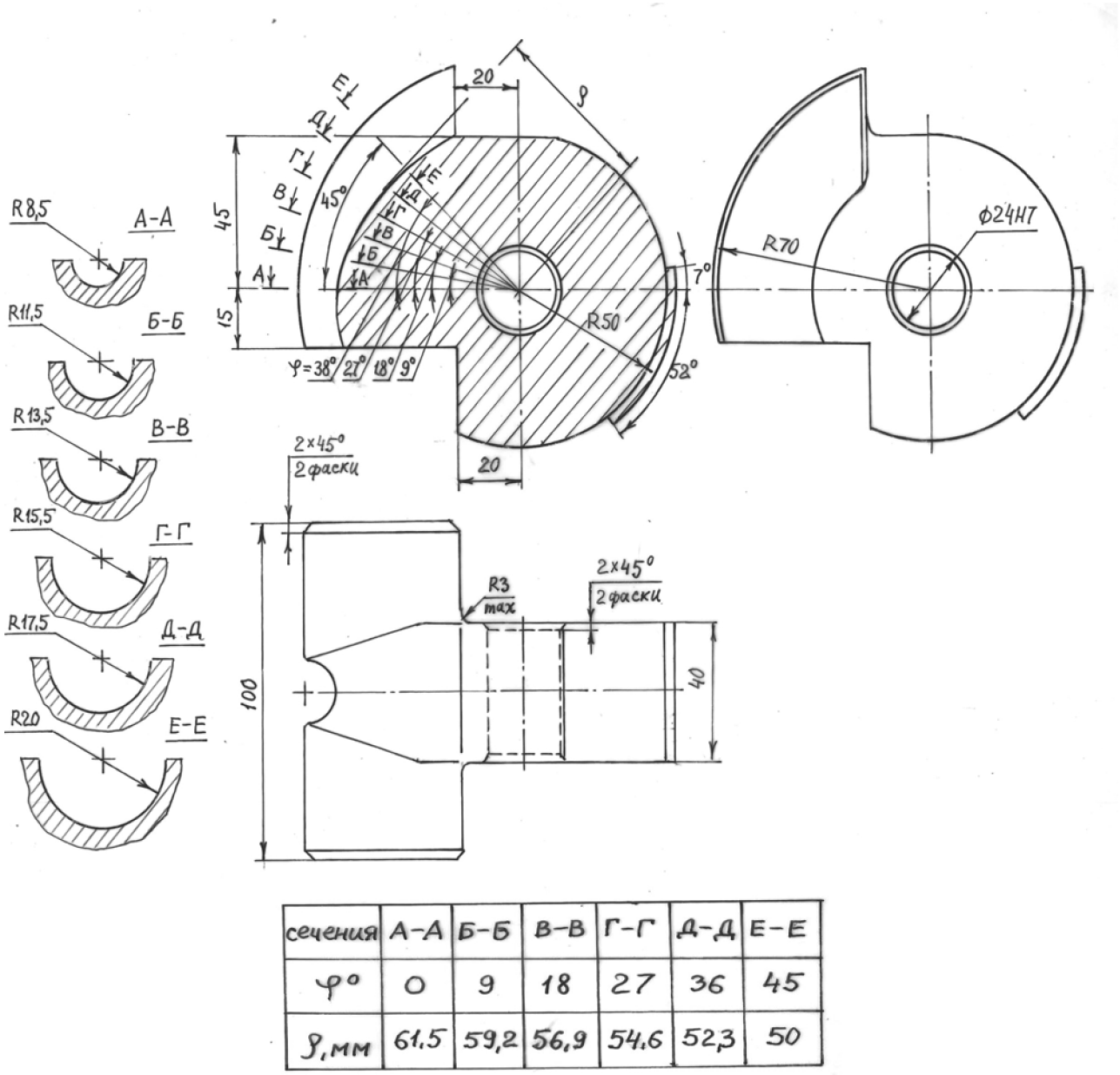
Штамп имеет нижнюю плиту *1*, на которой установлена опора *3*, в пазах опоры *3* размещены вальцы *5*.

Вальцы имеют (рис. 4) рабочую полость, в которой осуществляется формоизменение заготовки, отверстия для осей, на которых поворачиваются вальцы, и зубчатую часть.

Зубчатая часть вальцов предназначена для взаимодействия с зубчатой рейкой штампа, через которую создается сопротивление повороту вальцов и таким образом оказывается давление на заготовку при изменении диаметра матрицы.

Вальцы поворачиваются на осях, установленных в выточках опоры *3* (см. рис. 3) и зафиксированных в них винтами для предотвращения выдавливания моментом, создаваемым силой, действующей в полости матрицы. Оси вальцов установлены в отверстиях вальцов и в опоре с переходной посадкой H7/k6, чтобы не допускать свободного поворота вальцов, например, при установке заготовки.

Заготовка *4* деформируется в вальцах с помощью пуансона *6*, установленного в верхней плите *13* штампа. Для съема детали с пуансона предусмотрен съемник, размещенный и закрепленный стопорным винтом в траверсе *7*, перемещающейся по ввинченным в опору *3* шпилькам при воздействии на траверсу плиты штампа при ходе вниз и под действием пружин при ходе ползуна пресса вверх. Пружины поднимают траверсу со съемником на высоту, достаточную для того, чтобы снятая с пуансона деталь свободно размещалась между матрицей и съемником и ее можно было бы беспрепятственно извлечь из штампа.



сечения	А-А	Б-Б	В-В	Г-Г	Д-Д	Е-Е
φ°	0	9	18	27	36	45
9, мм	61,5	59,2	56,9	54,6	52,3	50

Рис. 4. Чертеж вальца, образующего половину полости матрицы штампа

В случае, если деталь остается после штамповки не на пуансоне, а в матрице, ее выталкивают выталкивателем *2* штампа, на который воздействует выталкиватель пресса.

Сопротивление повороту вальцов *5* при проталкивании заготовки через вальцы осуществляется гидро- или пневмоцилиндром *11* и передается через зубчатое зацепление между зубчатыми рейками и зубчатыми сегментами вальцов. Под действием рейки, опирающейся на гильзу *9* телескопического плунжера пневмоцилиндра, вальцы поворачиваются навстречу движению пуансона и обжимается концевая часть заготовки. После осуществления заданного поворота вальцов навстречу движению пуансона открывается полость цилиндра *11* и вальцы получают возможность поворачиваться уже под действием пуансона *6* в направлении, противоположном направлению их первона-

чального поворота. Поворот вальцов на этой стадии происходит с сопротивлением, сила которого равна произведению площади торца плунжера на давление в цилиндре. Момент сопротивления повороту каждого вальца равен произведению половины этой общей силы на расстояние от средней плоскости зубчатого зацепления до оси вращения вальца.

В разработанной конструкции штампа плунжер гидроцилиндра выполнен телескопическим, состоящим из трех частей – гильз, две из которых (внутренняя *8* и наружная *10*) выполнены из бронзы, одна (средняя *9*) – из стали. Корпус цилиндра *11*– стальной.

Соосность верхней и нижней частей штампа обеспечивается путем посадки стальной опоры вальцов в бронзовой втулке *8* с гарантированным зазором H7/h6. При этом возникла сложность осуществления контакта зубчатых сегментов вальцов с зубчатыми рейками, поскольку втулка расположена между ними. Чтобы такой контакт был возможен, во втулке выполнены пазы, через которые проходят имеющие форму диска средние части вальцов, соединяющие их профильные части с зубчатыми.

Наличие указанных пазов не позволяет реализовать традиционное расположение гильз (внутренняя выступает из средней, средняя – из наружной) при полностью раскрытом состоянии телескопического цилиндра, так как в этом случае полость цилиндра через пазы во втулке соединялась бы с атмосферой и цилиндр был бы неработоспособен.

В предлагаемом решении внутренняя гильза своим уплотнительным кольцом обеспечивает герметичность цилиндра, средняя гильза достигает крайнего нижнего положения всей телескопической системы (крайние положения гильз ограничены заплечиками).

Чтобы обеспечить удобство загрузки заготовки в штамп и извлечения штампованной детали, в средней гильзе выполнены окна. При этом предусмотрены элементы, предохраняющие гильзы от поворота в окружном направлении вокруг общей оси.

Предлагаемый штамп предназначен для эксплуатации на универсальных прессах. При использовании кривошипных прессов цилиндры противодавления в штампе подсоединяют к пневмосети, а при использовании гидравлических прессов – к их гидроприводам через предохранительный клапан.

Однако для размещения описанного штампа требуются прессы с большими размерами штампового пространства и большим ходом ползуна. В то же время сила, необходимая для выполнения штамповочной операции, невелика. Поэтому создается ситуация, когда, исходя из размеров необходимого штампового пространства для установки на пресс описанного штампа, приходится выбирать пресс с многократным превышением номинальной силы по

сравнению с силой, необходимой для выполнения штамповочной операции. Соответственно у такого пресса установочная мощность также значительно превышает мощность, требующуюся для выполнения штамповки. В результате пресс эксплуатируется с низким КПД.

Значительно более экономичным является отказ от использования пресса вообще. Вместо этого штамп укомплектовывают автономным гидроцилиндром (или даже пневмоцилиндром), способным создать необходимую для штамповки заготовки силу.

В результате получают устройство, которое является и не прессом, и не штампом. Оно предназначено (как обычный штамп) для штамповки конкретной детали и не нуждается в установке на универсальный пресс. Среди прочих преимуществ такого устройства отметим отсутствие необходимости установки его на фундамент и возможность эксплуатации на верхних этажах зданий.

2. ПРЕСС ДЛЯ ДВУХСТОРОННЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОКОВОК ДЕТАЛЕЙ С БОКОВЫМИ ОТРОСТКАМИ В РАЗЪЕМНЫЕ МАТРИЦЫ

Предлагаемая конструкция машины возникла из требования выполнения более прогрессивного технологического процесса при штамповке изделий с боковыми отростками (рис. 5).

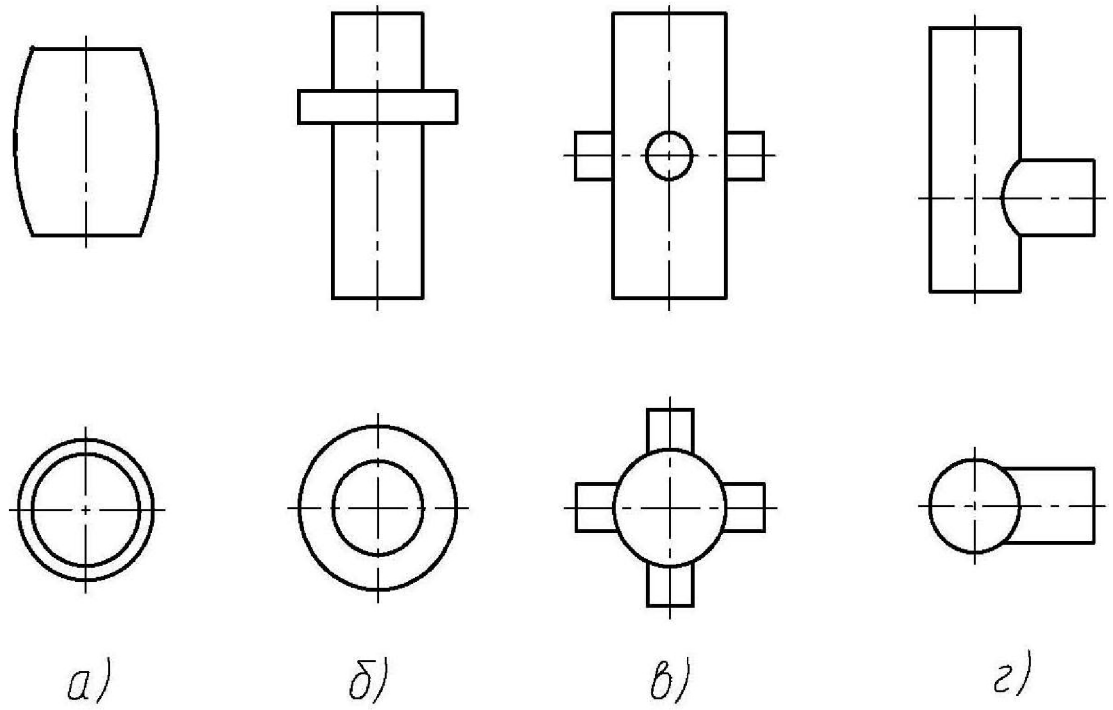


Рис. 5. Типовые поковки, изготавливаемые выдавливанием в разъемную матрицу:
а – для роликов подшипников; *б* – типа шестерен; *в* – типа крестовин;
г – типа фитингов трубопровода

В частности, деталью с боковыми отростками является крестовина карданного вала, которая производится на всех заводах автомобильной промышленности, тракторного и сельскохозяйственного машиностроения. На этих предприятиях крестовину штампуют в открытых штампах. При этом 30-40% металла уходит в заусенец.

Боковое выдавливание имеет ряд преимуществ по сравнению со штамповкой в открытых штампах. При выдавливании коэффициент выхода годного близок к 1,0, нет перерезания волокон при обрезке заусенца, волокна повторяют форму бокового отростка. Это приводит к повышению качества изделия с точки зрения механических характеристик.

При штамповке поковок (типа показанных на рис. 5, *б*) высадкой проблема состоит в возможности потери устойчивости заготовки. Если набираемый в средней части фланец имеет большой диаметр, что бывает при штамповке шестерен, то заготовка при штамповке высадкой будет иметь большое

отношение ее высоты к диаметру, что не позволит осуществить ее высадку без потери устойчивости.

При штамповке в разъемной матрице необходимо создавать как силу выдавливания, так и силу, сжимающую полуматрицы между собой (см. рис. 6, 8), поскольку металл, затекающий в боковые отростки (рис. 5, *в, г*) или во фланец, как на рис. 5, *б*, разжимает полуматрицы.

В зависимости от диаметров боковых отростков и их количества сила Q, сжимающая полуматрицы, может составлять от $0{,}5P$ до $0{,}75P$; при выдавливании крестовины: $Q = (0{,}5\ldots0{,}75)P$. Иногда Q может достигать $1{,}5P$, где P – сила выдавливания.

Поскольку пуансон движется отдельно от устройства смыкания полуматриц, а ползун пресса один, то для осуществления выдавливания в разъемные матрицы приходится создавать штампы очень сложной конструкции, которая осуществила бы движение и пуансона, и полуматриц с большими силами и по отдельным графикам перемещения. Поэтому для реализации рассматриваемой технологической операции целесообразно создание специализированных двухползунных прессов.

Используются две схемы выдавливания в разъемные матрицы. Это схемы одностороннего и двухстороннего выдавливания.

На схеме одностороннего выдавливания, показанной на рис. 6, заготовка выдавливается сверху. При таком выдавливании формируемый боковой отросток в верхней половине своего продольного сечения имеет бóльшую длину, чем в нижней половине. Это связано с характерным течением материала заготовки. В начале выдавливания заполняется нижняя половина отростка, а верхняя половина заполняется позже.

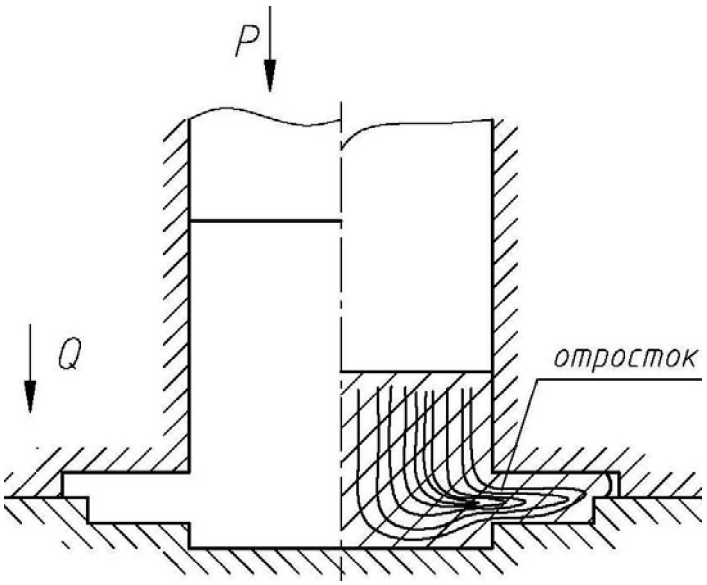


Рис. 6. Одностороннее выдавливание в разъемную матрицу

Указанное течение металла хорошо прослеживается на протравленном шлифе выдавленной поковки, приведенном на рис. 7. Как видно из этого рисунка, при одностороннем выдавливании очаг пластической деформации смещен вниз относительно оси боковых отростков, течение металла стеснено.

Поскольку для размещения излишнего объема заготовки на торцах боковых отростков предусматривают компенсационные полости, при одностороннем выдавливании их размещают в верхней полуматрице. При другом расположении компенсационных полостей верхняя часть торцов боковых отростков останется незаполненной.

Недостатком одностороннего выдавливания также является большая высота заготовки, проталкиваемой по поверхности контейнера, и, как следствие, высокая сила контактного трения, что приводит к перегрузке пуансона.

Кроме того, как видно на рис. 7, из-за смещения очага пластической деформации вниз относительно оси боковых отростков на нижней границе очага пластической деформации имеют место большие сдвиги слоев металла, что может привести к разрушению заготовки (отрыву нижней цилиндрической части). Это делает невозможной штамповку материалов, обладающих невысокой пластичностью.

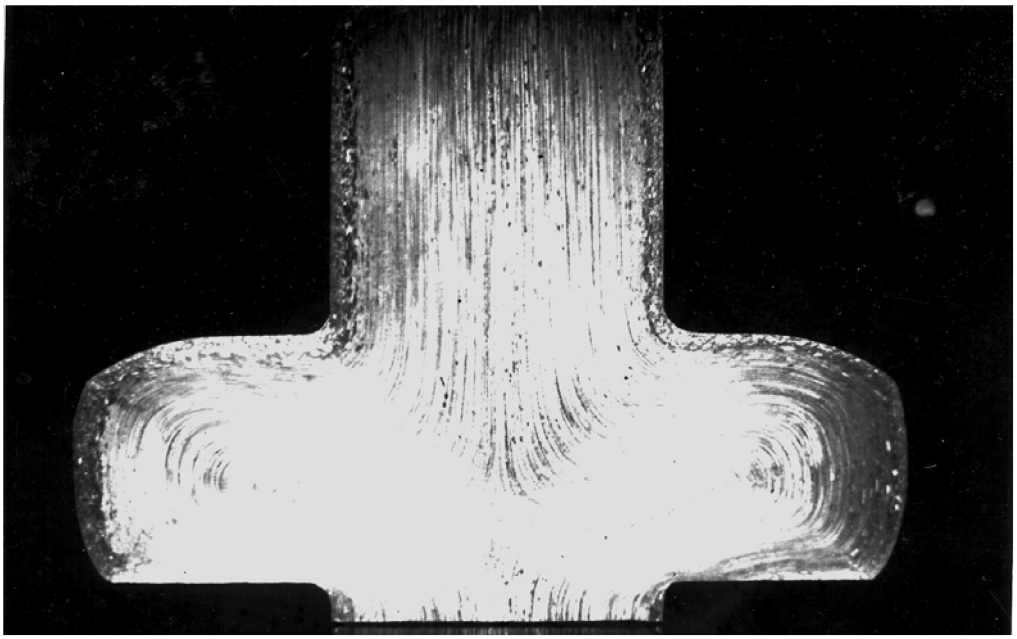


Рис. 7. Стесненная форма очага пластической деформации
при одностороннем выдавливании

При одностороннем выдавливании полуматрица, расположенная напротив пуансона, изнашивается быстрее, чем вторая полуматрица.

Недостатки, присущие одностороннему выдавливанию, могут быть устранены при выдавливании по двусторонней схеме (рис. 8).

При двухстороннем выдавливании часть высоты заготовки, выдавливаемой каждым из пуансонов, меньше, чем высота заготовки, приходящаяся на

пуансон при одностороннем выдавливании. Следовательно, нагрузка на каждый из пуансонов меньше, чем на пуансон при одностороннем выдавливании [15].

Вследствие этого удельная деформирующая сила при двухстороннем выдавливании снижается на 20-50% (в зависимости от соотношения размеров центральной части и боковых отростков) по сравнению с односторонним выдавливанием. Эффект снижения силы повышается при упрочнении материала в процессе выдавливания. Согласно диаграмме усталостной прочности снижение силы, действующей на пуансон и матрицу, приводит к значительному удлинению срока их службы.

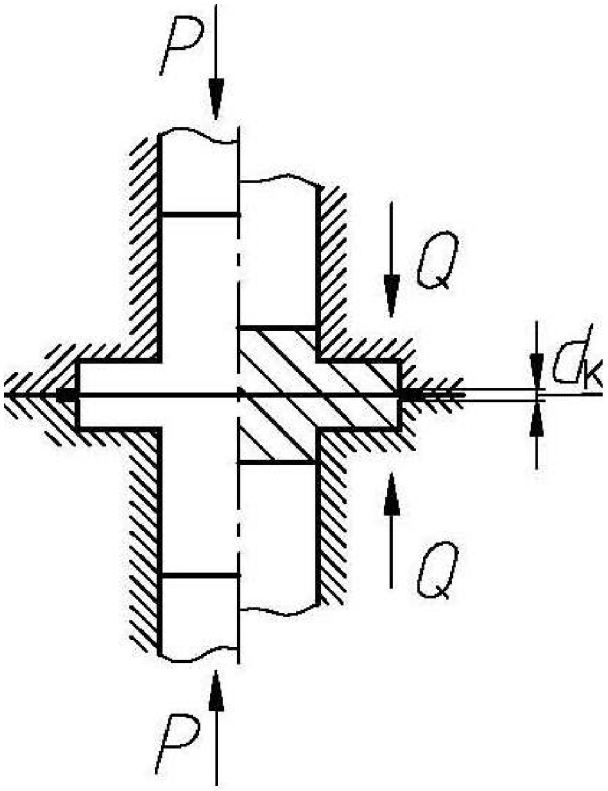


Рис. 8. Двухстороннее выдавливание в разъемную матрицу

При двухсторонней схеме деформирования напряженное состояние ближе к однородному, чем при односторонней. Это обусловливает более высокую пластичность заготовки.

При двухстороннем выдавливании износостойкость обеих полуматриц одинакова.

Как видно на рис. 9, имеет место равномерное затекание материала в отростки сверху и снизу, нет участков с повышенной величиной сдвигов между слоями металла.

Поскольку отросток равномерно заполняется металлом сверху и снизу, компенсатор с диаметром $d_к$ (см. рис. 8) для выдавливания излишков металла делают посередине диаметра отростка.

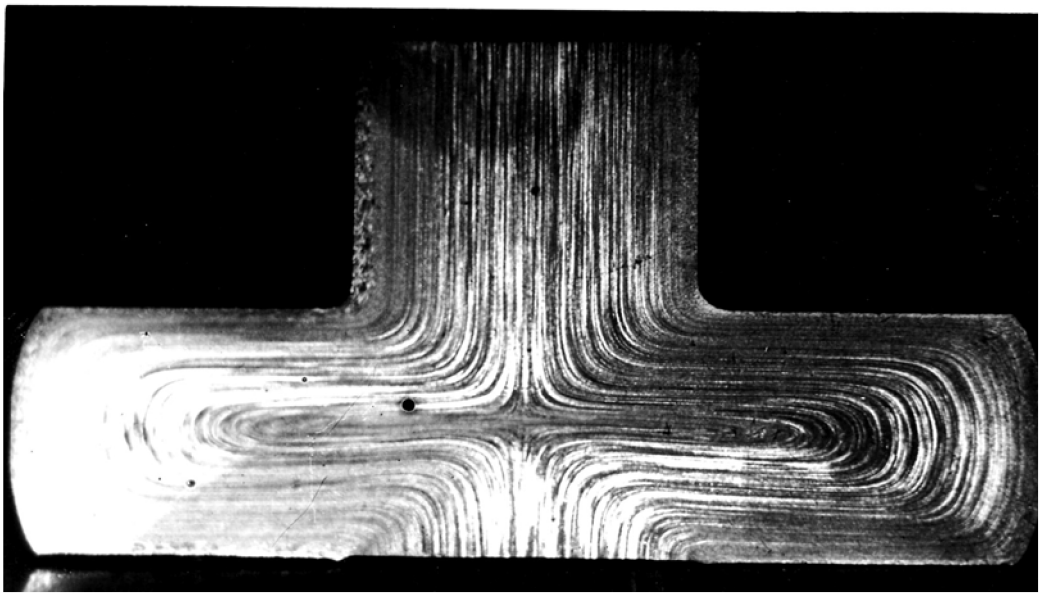


Рис. 9. Равномерное течение материала и симметричный очаг пластической деформации при двухстороннем выдавливании

Величина силы (рис. 10, *а*) при выдавливании в разъемную матрицу существенно зависит от величины радиуса скругления в полости матрицы у торца бокового отростка; на рис. 10, справа, показано, о каком радиусе скругления ведется речь.

При заполнении торцов отростков на заключительной стадии выдавливания сила значительно возрастает (рис 10, *б*). Поэтому целесообразно проводить выдавливание только на стадии истечения металла в отросток и отказаться от стадии заполнения кромок у торцов отростков или предусмотреть большие радиусы скругления у торцов боковых отростков.

На основании изложенного двухстороннее боковое выдавливание имеет ряд преимуществ по сравнению с односторонним.

Существенный недостаток двухстороннего бокового выдавливания состоит в необходимости применения для его осуществления штампа к универсальному прессу, имеющего существенно более сложную конструкцию, чем при одностороннем выдавливании. Однако и штамп для одностороннего выдавливания тоже сложный и громоздкий.

При установке на универсальный пресс при одностороннем и двухстороннем выдавливании в разъемную матрицу из-за громоздкости штампов пресса выдавливание производится по размерам штампового пространства, необходимого для размещения штампа. В результате выбранный пресс оказывается с большим запасом по силе штамповки, он имеет установочную мощность существенно большую, чем это необходимо для осуществления штамповки. Также он имеет излишне большую массу и используется с низким КПД. Особенно это проявляется при двустороннем выдавливании с более сложным и громоздким штампом по сравнению с односторонним выдавливанием.

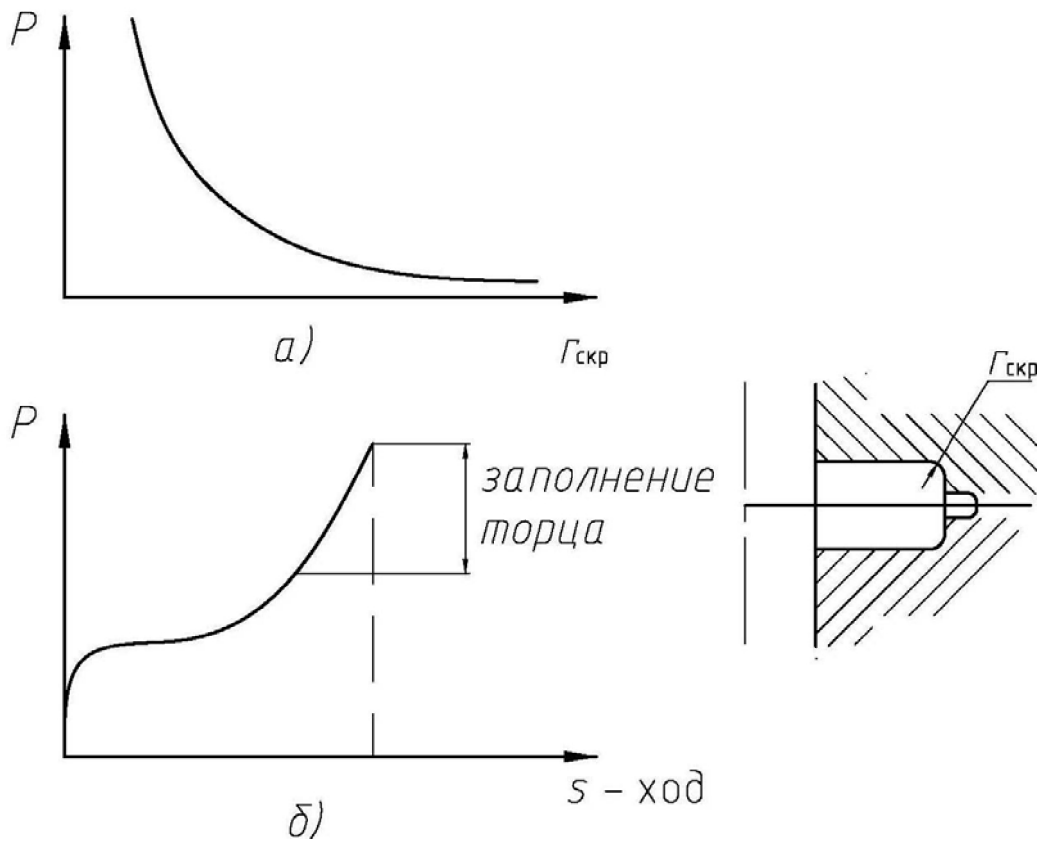


Рис. 10. Изменение силы выдавливания в зависимости от радиуса скругления на торце бокового отростка

Сказанное выше подтверждает целесообразность создания специализированных прессов или пресс-молотов для выдавливания в разъемные матрицы. Для реализации способа двухстороннего выдавливания, который является более совершенным по сравнению с односторонним, требуется создание машин со встречным ходом ползунов.

Нами разработан проект такой машины (рис. 11). Штамповка на ней выполняется автоматически [15].

При проектировании автомата были заданы технические условия из расчета процесса двухстороннего бокового выдавливания крестовины, штампуемой на заводе «Ростсельмаш». Размеры крестовины в плане 94 мм х 94 мм.

Из расчета технологического процесса были заданы следующие исходные данные для проектирования автомата:

Номинальная сила	1 МН
Энергия удара	17,5 кДж
Сила, сжимающая разъемные матрицы	0,4 МН
Суммарный ход ползунов	200 мм
Ход деформирования	60 мм
Число ходов в минуту	12

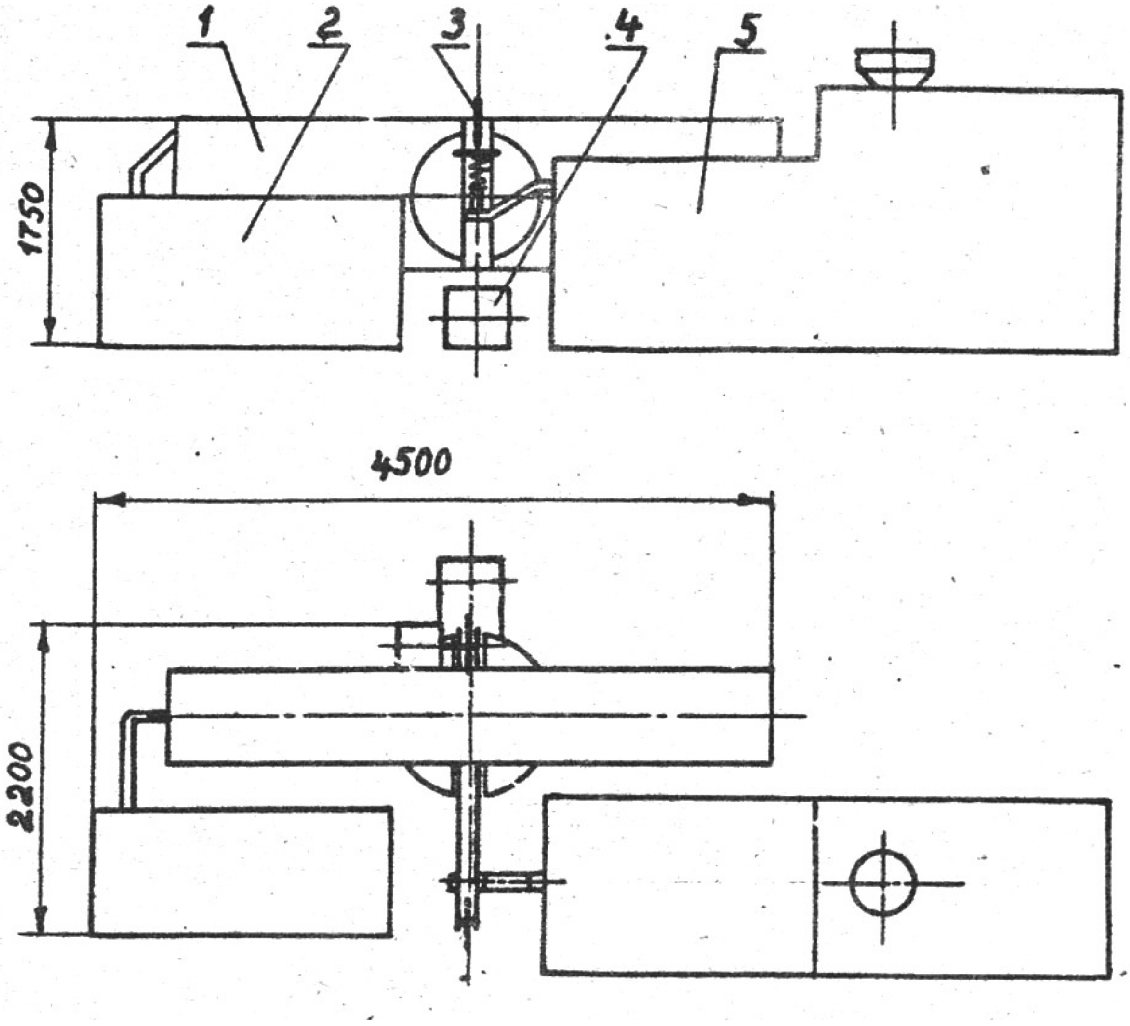


Рис. 11. Автомат для двухстороннего бокового выдавливания
в разъемные полуматрицы

Автомат состоит из бесшаботного гидровинтового пресс-молота *1*, гидропривода *2*, механизма подачи заготовок в штамп *3*, конвейера *4*, на который попадают готовые поковки, индукционного нагревателя *5*.

Бесшаботный гидровинтовой пресс-молот имеет горизонтально движущиеся ползуны (рис. 12). Название пресс-молот связано, во-первых, со скоростью перемещания ползунов, которая достигает 4 м/с, что ниже, чем у молота. Такая ограниченная скорость характерна для кузнечно-штамповочных машин с гидровинтовым приводом. Привод осуществляется от насосно-аккумуляторной гидравлической станции. Винтовое движение подвижных масс в разработанной нами конструкции создается посредством несамотормозящих резьб на внешних поверхностях гидроцилиндров встречного рабочего хода ползунов и поверхностях бронзовых гаек, закрепленных в поперечинах станины. При этом рабочие гидроцилиндры вследствие своего вращения при разгоне ползунов накапливают кинетическую энергию, которую отдают при деформировании поковок.

Специализация пресс-молота для выдавливания в разъемные матрицы состоит в том, что каждый из ползунов выполнен двойным. Наружные части ползунов *4* связаны с полуматрицами *6*, а внутренние *2* – с пуансонами *5* штампов. Наружная часть каждого ползуна приводится в движение от внутренней части посредством установленных между ними пружин *3*. После смыкания полуматриц штампа подается жидкость высокого давления в гидроцилиндры *1*, связанные с наружными частями ползунов и удерживающие полуматрицы в сомкнутом состоянии во время заполнения их полостей металлом. При неподвижных наружных частях ползунов и сомкнутых полуматрицах внутренние части ползунов продолжают движение и установленные на них пуансоны производят выдавливание заготовки.

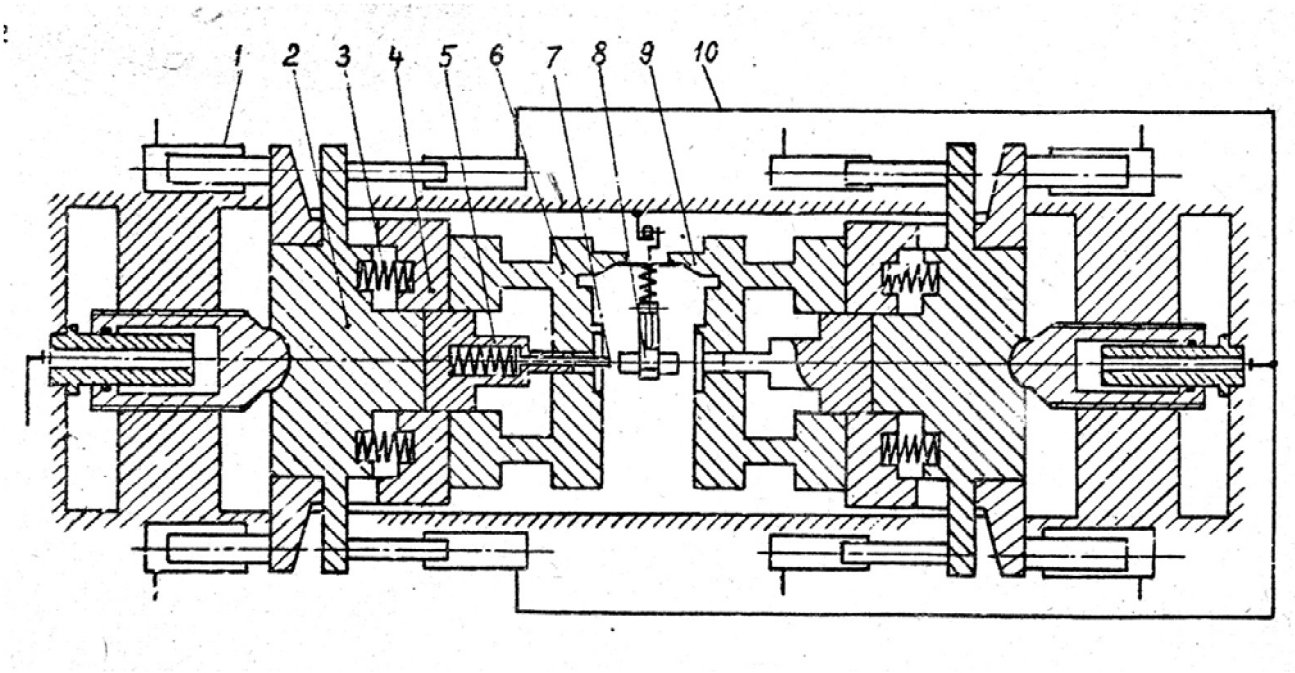


Рис. 12. Бесшаботный гидровинтовой пресс-молот

Для обеспечения постоянного места смыкания полуматриц предусмотрена гидравлическая связь *10* между ползунами машины. Для этого рабочая жидкость, вытесняемая при рабочем ходе машины из гидроцилиндров возвратного хода ведущего (левого по схеме) ползуна, поступает в гидроцилиндр рабочего хода ведомого (правого по схеме) ползуна. При возвратном ходе машины рабочая жидкость подается в гидроцилиндры возвратного хода правого ползуна, а из гидроцилиндра рабочего хода этого ползуна жидкость поступает в гидроцилиндры возвратного хода левого ползуна. При такой гидравлической связи достигается синхронность в перемещении ползунов.

Для подачи заготовок в штамп разработан механизм в виде цепного транспортера с установленными на нем двадцатью клещами. Транспортер соединен с ползуном машины через редуктор. В конструкцию редуктора введена муфта обгона. Это позволяет осуществлять продвижение транспортера на шаг

при возвратном ходе ползунов и его выстой при рабочем ходе в положении, когда клещи с заготовкой *8* находятся против контейнера матрицы.

Во время рабочего хода кулачки *9*, установленные в штампе, раскрывают клещи. Раскрытые клещи размещаются по сторонам от полуматриц и не мешают их смыканию. В одном из пуансонов размещен ловитель *7*, подпружиненный в направлении оси пуансона. Этот ловитель начинает толкать заготовку в полость противоположной полуматрицы одновременно с началом раскрытия клещей. Поэтому заготовка не выпадает из клещей при их раскрытии, а фиксируется в полости противоположной полуматрицы. При выдавливании заготовки пуансонами ловитель утапливается внутрь своего пуансона.

Полуматрицы смыкаются и производится деформирование заготовки. Поковка выталкивается из штампа при возвратном ходе ползунов пресса.

Для удаления поковок предусмотрено их застревание при размыкании полуматриц всегда в левой (рис. 12) из них. В этой части штампа в пуансоне *5* размещен утапливаемый во время штамповки внутрь пуансона подпружиненный ловитель *7*. Сжатая пружина ловителя имеет силу большей величины, чем сила, с которой поковка застревает в левой полуматрице. Вследствие этого поковка выталкивается из полуматрицы вниз на расположенный под штамповым пространством пресс-молота транспортер.

При возвратном ходе ползунов пресса происходит перемещение транспортера на один шаг и следующие клещи с заготовкой входят в штамповое пространство, а готовая поковка выталкивается ловителем на ленточный транспортер.

Рабочий ход ползунов пресс-молота осуществляется от аккумуляторного привода. При нем ползуны достигают большой скорости. Возвратный их ход имеет существенно меньшую скорость. Он осуществляется непосредственно от насоса, минуя аккумулятор, поэтому транспортер с установленными на нем подающими заготовки клещами движется с невысокой скоростью и работает достаточно надежно.

Раскрытие клещей для захвата заготовки от индуктора осуществляется неподвижно установленным против полости индуктора кулачком *11*, под которым проходят клещи (рис. 13).

Во время работы машины штамповое пространство закрывается ограждением сферической формы. Цель ограждения двоякая. Во-первых, оно изолирует движущиеся части машины, не допуская возможности соприкосновения человека с ними или попадания в штамповое пространство посторонних предметов. Во-вторых, оно снижает шум, возникающий при работе машины. Для снижения шума металлический кожух изнутри покрыт слоем звукопоглощающего материала – стекловолокна.

Был проведен экономический расчет штамповки крестовины на описанном автомате применительно к программе завода «Ростсельмаш». На заводе

«Ростсельмаш» для штамповки крестовины была освоена автоматическая линия. На этой линии крестовину изготавливали односторонним боковым выдавливанием, при этом использовался универсальный кривошипный пресс. Штамп для бокового выдавливания, установленный на этом прессе, был оснащен сложными механизмами, и штамповка осуществляется автоматически. Размещение громоздкого штампа и механизма подачи заготовок и удаления поковок потребовали применения пресса с номинальной силой 4 МН вместо силы 1 МН, необходимой для штамповки. Несмотря на значительные затраты при замене процесса открытой штамповки на штамповку односторонним выдавливанием на таком автоматизированном универсальном прессе завод «Ростсельмаш» получил экономию, которую в современных ценах можно считать равной 6 млн 900 тыс. рублей в год.

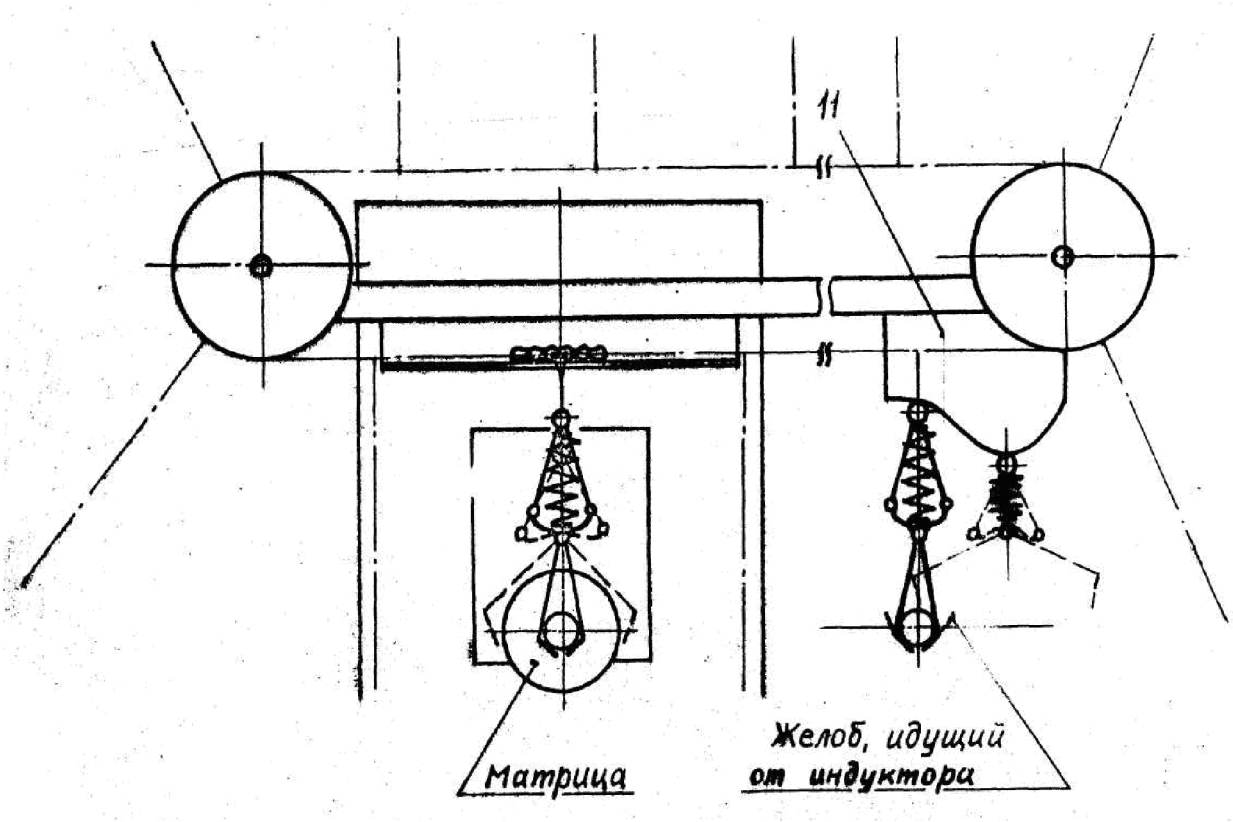


Рис. 13. Раскрытие клещей для захвата нагретой заготовки от индуктора

Разработанный автомат позволяет получить экономию по сравнению с автоматизированным прессом завода «Ростсельмаш» 3 млн 600 тыс. руб. в год, а при замене открытой штамповки (при расчете на ту же программу) 10 млн 500 тыс. руб. в год.

3. МАЛОГАБАРИТНЫЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРЕССЫ

В доперестроечный период машиностроительную продукцию выпускали предприятия, укомплектованные оборудованием, произведенным на специализированных прессостроительных заводах. Специализированные прессостроительные заводы были заинтересованы в выпуске крупного универсального оборудования. Об этом свидетельствуют номенклатурные каталоги выпускаемой продукции этих предприятий.

Предполагалось, что на прессе с большим запасом по силе и установочной мощности при необходимости можно изготовить мелкие штампованные изделия, если установить соответствующие штампы. Это характерно не только для отечественной промышленности, но и для зарубежной. Одному из авторов довелось участвовать в обсуждении заказа из США, в котором серебряный клапан для флейты предполагалось штамповать выдавливанием на гидропрессе силой 8 МН, хотя потребная для штамповки сила была в 50 раз меньше.

При создании малогабаритного пресса его во многих случаях целесообразно разрабатывать для изготовления определенной детали или группы деталей. При этом возможно вообще отказаться от штампа и даже ползуна пресса, как это будет показано ниже.

Габариты вновь создаваемого пресса и трудоемкость его изготовления становятся близки к трудоемкости изготовления и стоимости штампа для универсального пресса. Необходимость иметь универсальный пресс, размещать, обслуживать его при таком подходе отпадает.

Ниже на примере развития новой технологии – выдавливания с активным действием сил контактного трения – показан изложенный нами общий подход к конструированию системы пресс – штамп.

3.1. Расширение области применения холодной объемной штамповки выдавливанием с активными силами трения

Использование активных сил контактного трения позволяет расширить область применения перспективной технологии холодной объемной штамповки. До настоящего времени последняя находит значительно более узкое применение, чем горячая объемная штамповка. Это объясняется следующим.

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.

Увеличение деформации сверх значения, соответствующего пределу текучести, приводит в поликристалле к тому, что зерна получают вытянутую форму в направлении наиболее интенсивного течения металла. Одновременно

с изменением формы зерен в процессе деформации происходит поворот кристаллографических осей отдельных зерен в пространстве. Как следствие, при значительной деформации возникает преимущественная ориентировка кристаллографических осей зерен поликристалла, называемая текстурой деформации, а также увеличивается количество несовершенств кристаллической решетки. При деформации поликристалла, как и при деформации отдельных зерен, возрастание количества внутризеренных несовершенств кристаллической решетки приводит к увеличению сопротивления пластической деформации и упрочнению металла.

Процессы внутрикристаллитной деформации являются основными процессами, обусловливающими изменение формы поликристаллического тела. Значительная пластическая деформация может происходить в случае достаточно прочных границ зерен, когда межкристаллитные 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. Поэтому с нагревом до ковочных температур доля межкристаллитной деформации в общей деформации металла увеличивается.

Общим положением для всех металлов и сплавов является то, что наибольшую пластичность они имеют при температурах рекристаллизации, т.е. в условиях горячего деформирования, которым одновременно соответствуют и малые значения показателей прочности, а следовательно и сопротивления деформированию. 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.

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 то же 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 (листов с толщиной не менее 10 мм и заготовок из сортового проката массой более 0,1 кг).

Изготовленные горячей штамповкой поковки содержат окалину на поверхности. Кроме того, из-за интенсивного окисления слой металла под ока-

линой имеет химический состав, отличающийся от состава основной массы поковки. Это приводит к необходимости предусматривать большие напуски на размеры поковки, удаляемые при последующей обработке резанием.

Заготовки малых размеров и тонколистовые заготовки обрабатывают в условиях холодной деформации.

В существовавшем до недавнего времени разграничении областей горячей и холодной объемной штамповки существовал, наряду с техническим, психологический фактор. Крупные машиностроительные предприятия обладали парком нагревательного оборудования, металлорежущих станков. Металл стоил дешево. Ветераны технологических бюро, в течение многих лет разрабатывавшие процессы горячей объемной штамповки, не были заинтересованы в своей переквалификации, и приходящих на предприятия молодых специалистов подключали к горячей штамповке.

В настоящее время при организации новых предприятий отказ от приобретения парка нагревательных устройств и парка станков для обточки припусков на горячештампованных поковках, с учетом возрастания стоимости металла, делает холодную объемную штамповку значительно более привлекательной.

Как показывает опыт международных научно-технических конференций, область холодной штамповки в странах Запада также постоянно расширяется.

Чтобы уменьшить анизотропию свойств заготовок, изготавливаемых холодной штамповкой из металлопроката, перспективна штамповка деталей из металлических порошков, поскольку химическую однородность отдельных частиц порошка, их размеры и кристаллическое строение обеспечить значительно проще.

Другое преимущество порошковой металлургии для изготовления металлических 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.

Холодное выдавливание позволяет изготовлять поковки, размеры и качество поверхности которых удовлетворяют требованиям, предъявляемым к машиностроительным деталям, или близки к ним. Благодаря этому последующая обработка резанием и отходы металла сведены к минимуму. Однако для выполнения холодного выдавливания необходимо создавать удельные силы, величина которых в ряде случаев составляет четыре и более значений напряжения текучести материала деформируемой заготовки. Это обстоятельство является одной из причин, затрудняющих применение операции холодного выдавливания для среднеуглеродистых сталей, так как стойкость инструмента (в первую очередь пуансонов) является недостаточной, чтобы технологический процесс был конкурентоспособным по сравнению с другими.

Практикой установлено, что величина удельной силы, воспринимаемая пуансонами из сталей Р9М4, Р6М3, Р6М5, ЭП761, твердость которых HRC 61-63, не должна превышать 2500 МПа.

В настоящее время для снижения деформирующей силы наряду с применением различных смазок и способов обработки поверхности заготовок, позволяющих уменьшить силы контактного трения, проводят выдавливание с активными силами трения.

На рис. 14 приведена схема выдавливания с активными силами трения. На схеме *1* – пуансон, *2* – заготовка, *3* – матрица, *4* – выталкиватель. Если скорость перемещения матрицы v_1 больше скорости истечения металла $v_{ист}$, то направление сил трения на контакте с матрицей способствует течению металла и позволяет снизить удельную силу выдавливания на 15-25%. Снижение удельной силы на такую величину позволяет вдвое и более повысить стойкость выдавливающих пуансонов.

Выдавливание по приведенной на рис. 14 схеме можно осуществлять на универсальных прессах в штампах, имеющих дополнительную траверсу с отдельным гидроприводом для перемещения матрицы в процессе выдавливания. Однако такие штампы громоздки, для их установки приходится выбирать прессы с большими размерами штампового пространства и, соответственно, большими, чем необходимо, номинальной силой и установочной мощностью электропривода. Это снижает КПД работы прессов.

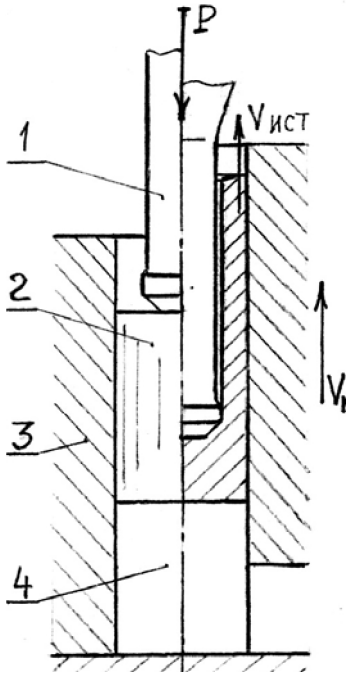


Рис. 14. Схема выдавливания с активными силами трения

Практика конструирования штампов для выдавливания с активными силами трения показала, что поскольку в любом случае требуется дополнительная траверса с отдельным гидроприводом, целесообразно отказаться от уста-

новки такого штампа на универсальный пресс, а предусмотреть в самом штампе гидроцилиндр, создающий деформирующую заготовку силу. Конструкция автономного штампа или специализированного пресса для выдавливания с активными силами контактного трения приведена на рис. 15.

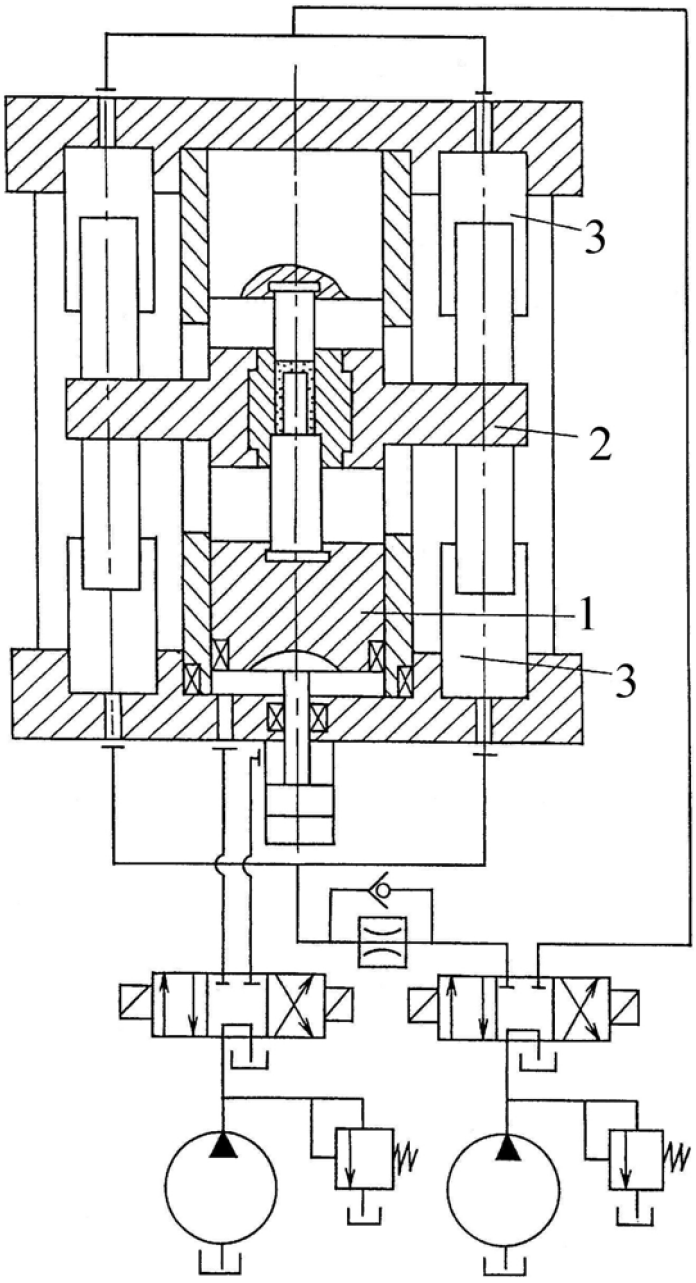


Рис. 15. Конструкция пресса для выдавливания с активными силами трения

В прессе, если матрицу, установленную в траверсе *2*, с помощью гидроцилиндров *3* перемещать в направлении течения материала со скоростью, превышающей скорость течения, силы 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 выдавливающий пуансон.

Фотография пресса, имеющего номинальную силу 2 МН, приведена на рис. 16. Масса этого пресса (без приводов) составляет 2 т.

При эксплуатации описанного пресса (рис. 15) выявлено, что траверса *2* имеет недостаточную жесткость и высоту посадочной поверхности в гильзе. В результате в процессе выдавливания возможен перекос траверсы при несинхронной работе гидроцилиндров *3*, что приводит к несоосности внутренней и наружной поверхностей выдавливаемого изделия. Для устранения этого недостатка целесообразно конструировать прессы для выдавливания с принудительным перемещением матрицы в соответствии со схемой, приведенной на рис.17.

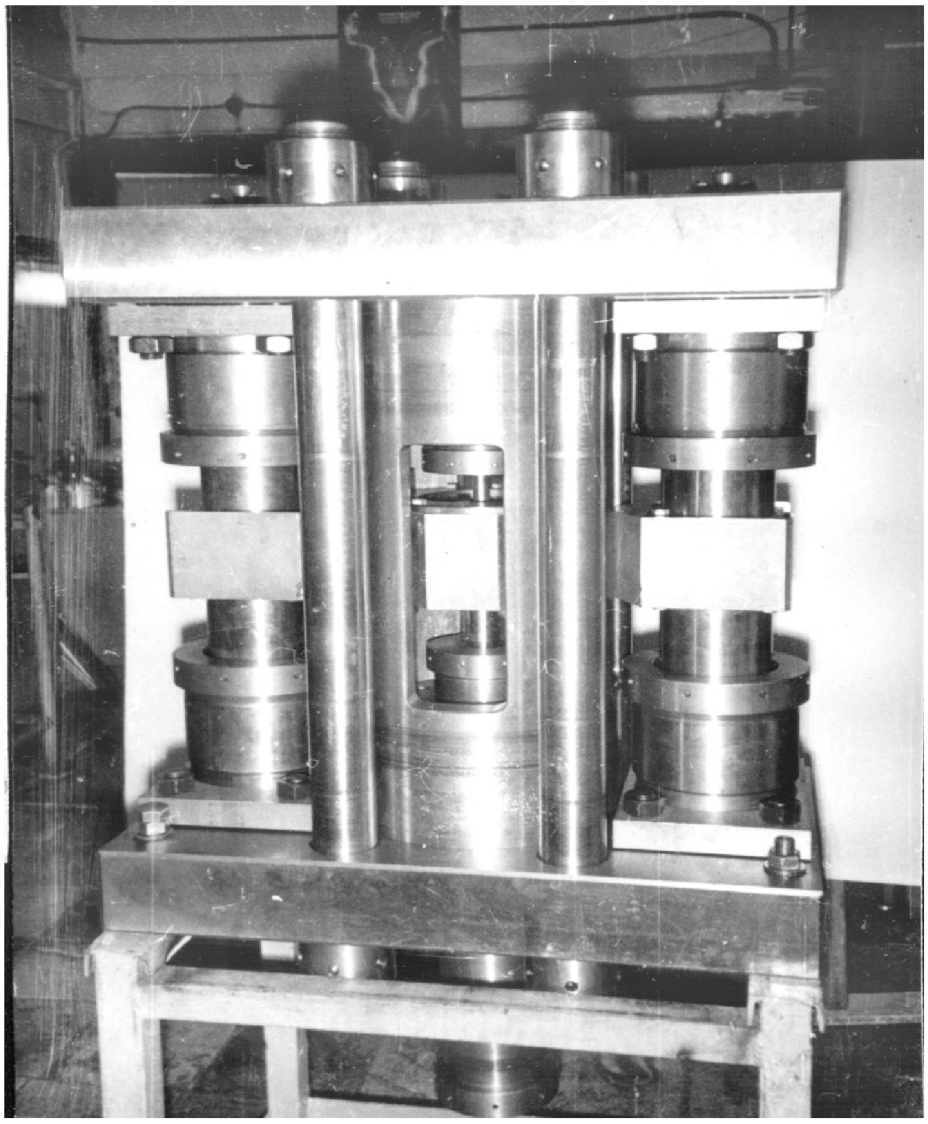


Рис. 16. Пресс для выдавливания с активными силами трения

В этой конструкции главный гидроцилиндр *8* выполнен вне гильзы *3* и размещен под столом пресса. На его плунжере *7* установлен пуансон *6*. Второй пуансон *4* установлен на опоре *2*. Матрица *5* скреплена с гильзой *3*, которая перемещается боковыми гидроцилиндрами *1* по опоре *2*.

Описанная выше конструкция специализированного пресса для выдавливания с активными силами трения имеет тот недостаток, что для его изготовления требуется применение координатно-расточных станков. Более технологична в изготовлении конструкция пресса (рис. 18), в которой все гидроцилиндры размещены на одной общей оси. При ее изготовлении требуются в основном токарные, круглошлифовальные и простые фрезерные работы.

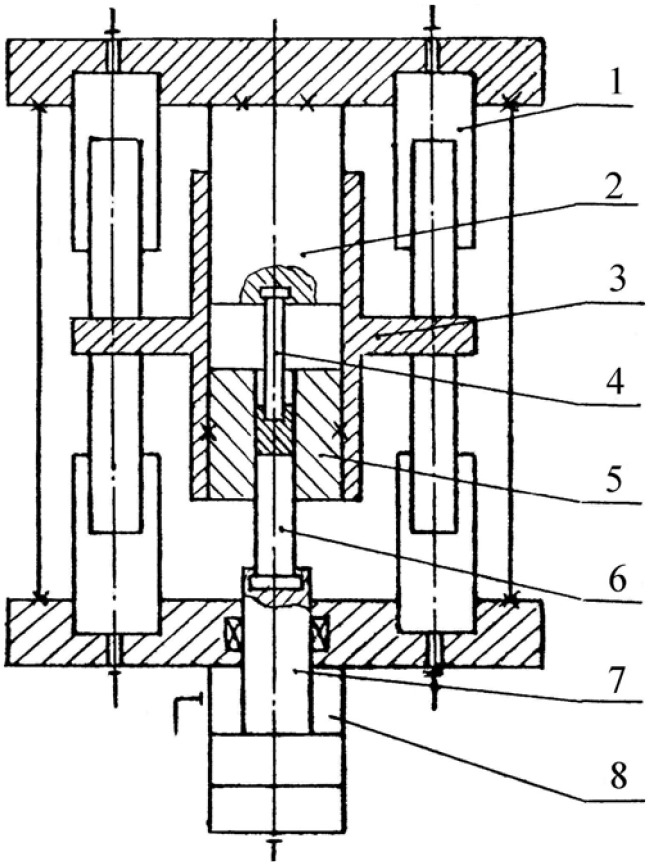


Рис. 17. Схема пресса с повышенной жесткостью траверсы для перемещения матрицы

В прессе главный гидроцилиндр *1* расположен под столом *2*. Плунжер главного гидроцилиндра является ползуном пресса и штамповой плитой. На нем установлен пуансон *4*. Второй пуансон *6* закреплен на опоре *8*, которая служит штоком гидроцилиндра *7*. К гильзе гидроцилиндра *7* крепят траверсу *5* пресса, служащую для перемещения матрицы *3* в процессе деформирования.

Рабочие части пресса приводятся в движение от двух насосов. При подаче рабочей жидкости в поршневую полость *А* главного гидроцилиндра поршень совершает рабочий ход, а при подаче рабочей жидкости в штоковую полость *Б* – обратный ход. Прямой и обратный ходы траверсы осуществляются при подаче рабочей жидкости соответственно в полости *Г* и *В* гидроцилиндра привода траверсы пресса, служащей для перемещения матрицы.

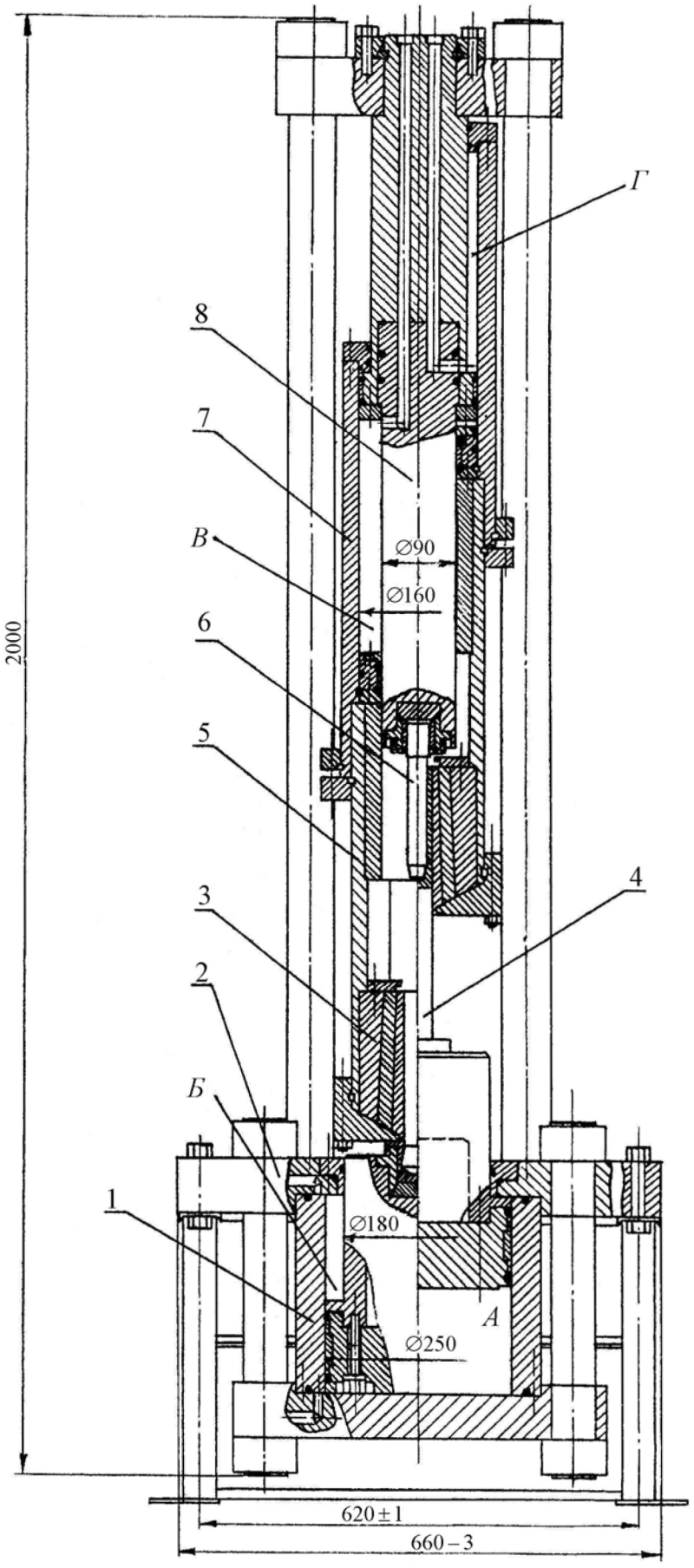


Рис. 18. Конструкция пресса для выдавливания с активными силами трения

В конструкции пресса предусмотрено надежное направление гильзы *5* по опоре *8*, что позволяет свести к минимуму несоосность верхнего пуансона и матрицы.

Техническая характеристика пресса для выдавливания с активными силами трения (скорость прессования 2,7 мм/с):

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 матрицы, мм/с:	
вверх	12,7
вниз	6,8
Габариты, мм	650 х 500 х 2000
Масса без привода, кг	1200
Установочная мощность, кВт	8,5

Фотографии пресса приведены на рис. 19, 20.

По этому принципу сконструирован другой пресс (рис.21). Масса этого пресса, имеющего силу 1 МН, всего 350 кг.

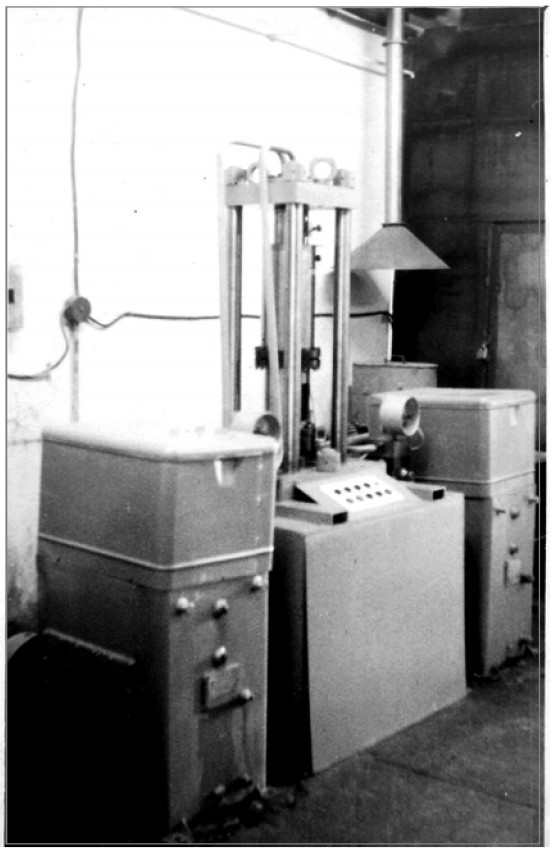


Рис. 19. Пресс для выдавливания с активными силами трения на производственном участке

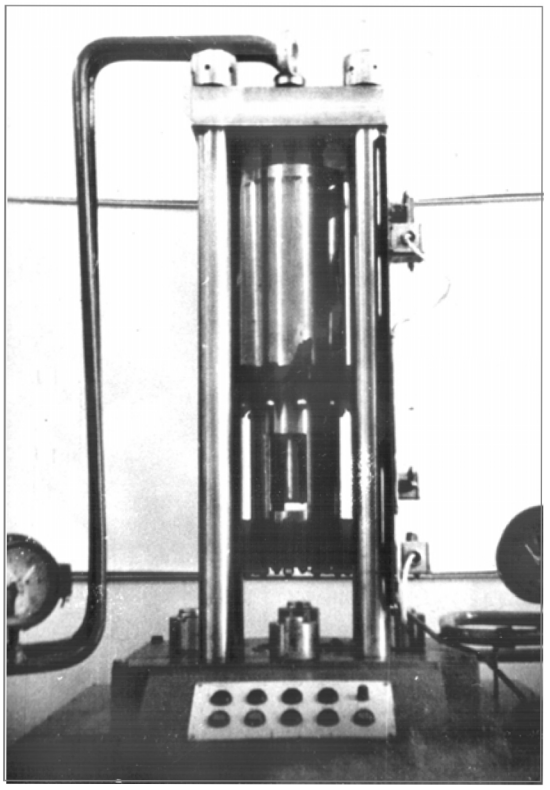


Рис. 20. Верхняя часть пресса для выдавливания
с активными силами трения

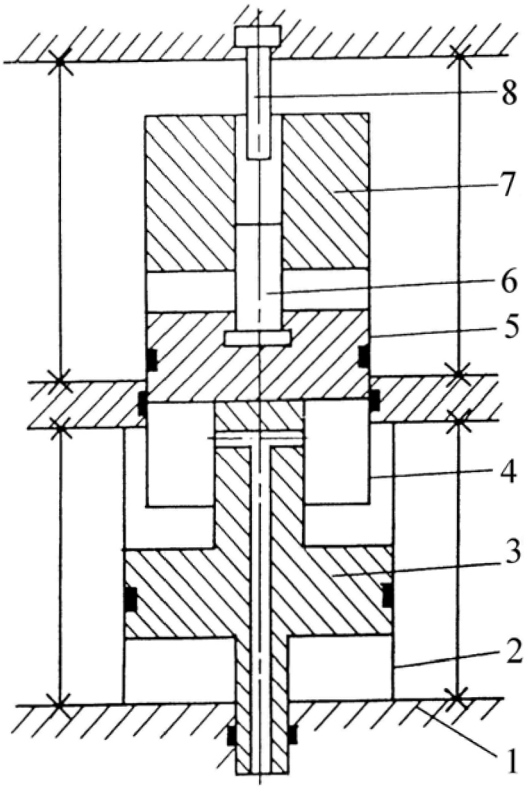


Рис. 21. Конструкция особо малогабаритного пресса для выдавливания
с активными силами трения

В прессе шток вспомогательного гидроцилиндра *4* является одновременно штоком главного гидроцилиндра 2 с поршнем *3*, а гильза вспомогательного гидроцилиндра является дополнительным плунжером главного гидроцилиндра.

При подаче рабочей жидкости в нижнюю полость главного гидроцилиндра пуансон *6*, установленный на поршне *5* вспомогательного гидроцилиндра, деформирует заготовку относительно неподвижного пуансона *8*, закрепленного на верхней поперечине станины *1*. По мере уменьшения объема верхней полости главного гидроцилиндра из него вытесняется гильза вспомогательного гидроцилиндра, перемещая матрицу *7*. Скорость движения матрицы регулируется путем дополнительной подачи жидкости в верхнюю полость главного гидроцилиндра от гидропривода или путем ее выпуска из этой полости через дроссель. Жидкость из нижней полости вспомогательного гидроцилиндра сливается через осевое отверстие в общем штоке гидроцилиндров. Для возвратного хода жидкость подается через это отверстие. В результате гильза вспомогательного гидроцилиндра с матрицей перемещается вниз, изделие при этом выталкивается из матрицы. После упора гильзы *4* в поршень главного гидроцилиндра происходит их совместное перемещение вниз до исходного положения для нового рабочего хода. При этом деталь съемником (на схеме не показан) снимается с пуансона *8*.

На описанных прессах отработана технология штамповки сдвоенных втулок, показанных на рис. 22, 23 и 24.

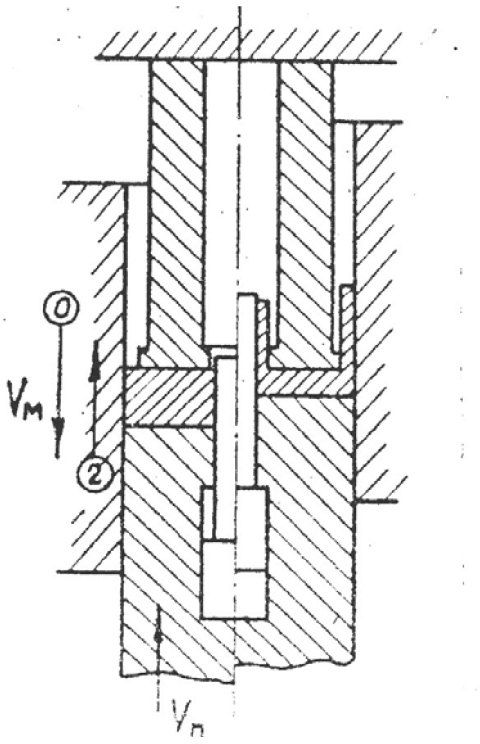


Рис. 22. Схема выдавливания сдвоенных втулок

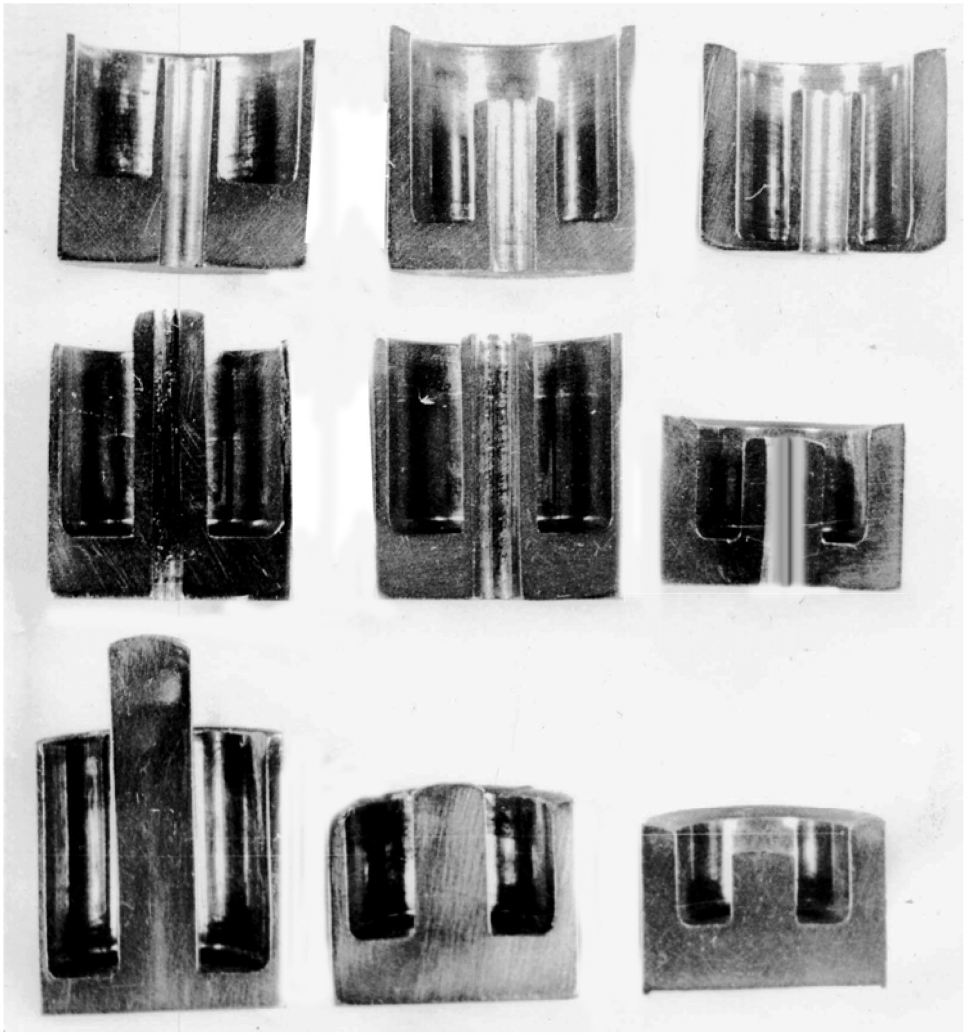


Рис. 23. Втулки из стали 15, изготовленные выдавливанием
с использованием сил контактного трения для управления соотношения
высот стенок

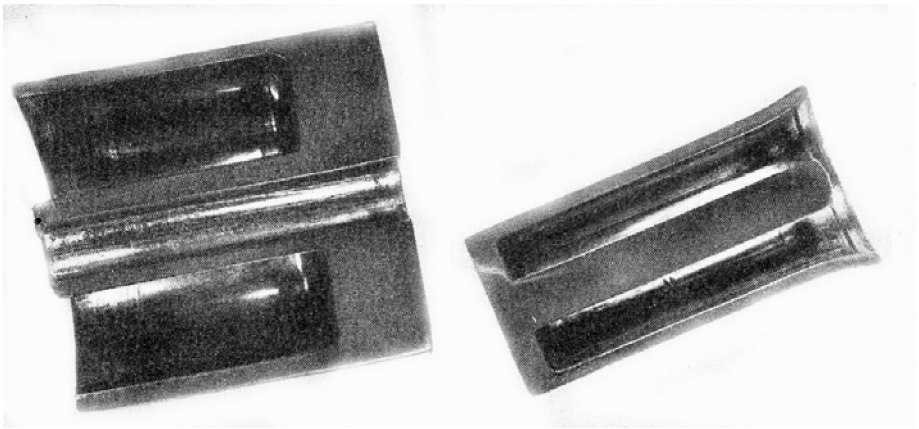


Рис. 24. Втулки, изготовленные холодным выдавливанием
из стали 20Х

При штамповке по схеме на рис. 22 деформирующая сила создается пуансоном, перемещаемым со скоростью $v_{п}$.. В зависимости от направления перемещения матрицы (на схеме условно обозначено $v_{м} = 0$ или $v_{м} = 2$) можно направить течение металла соответственно во внутреннюю или во внешнюю стенки детали и регулировать соотношение высот стенок (рис. 23).

При этом силы трения также используются для снижения удельной деформирующей силы, что позволяет осуществлять холодное выдавливание деталей даже из легированных сталей (рис.24).

На прессах рассмотренного типа повышается возможность использования так называемых компенсационных полостей в штампах (рис. 25) для уменьшения удельных сил, действующих на пуансоны, и создания условий холодного выдавливания легирующих сталей.

На рис. 25 показана схема выдавливания стакана со ступенчатой внешней поверхностью из заготовки, имеющий внешний диаметр $2R$, пуансоном с диаметром $2r$.

Исходная заготовка имеет диаметр, равный $2R$. Матрица в исходном положении опирается на нижний пуансон, и полость, в которую укладывают заготовку, также равна $2R$. По мере внедрения верхнего пуансона в матрицу последнюю передвигают вверх со скоростью $v_{м.}$ При этом на внешней поверхности заготовки действуют активные силы контактного трения, а на уровне ступени матрицы последовательно открывается компенсационная полость, уменьшающая гидростатическое давление в заготовке и снижающая удельную силу выдавливания. Это способствует существенному повышению стойкости инструмента.

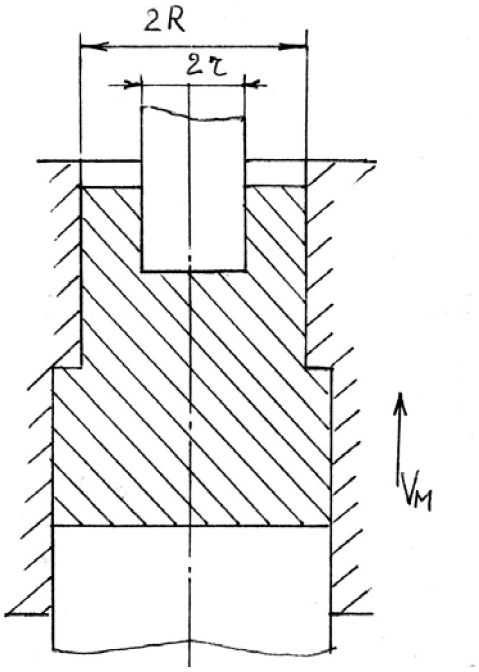


Рис. 25. Схема выдавливания с расширяющейся компенсационной полостью в матрице

Подводя итог, отметим, что изготовление описанных прессов возможно на предприятиях, которым эти прессы нужны для эксплуатации. Трудоемкость изготовления пресса незначительно превышает трудоемкость изготовления штампа для выдавливания к универсальному прессу. Коэффициент полезного действия специализированных прессов выше, чем универсальных. Масса специализированных прессов существенно меньше, чем универсальных, что позволяет использовать их на верхних этажах зданий.

3.2. Штамповка композиционных материалов

Такие материалы, которые состоят из двух или более компонентов, не вступающих между собой в химическую реакцию настолько активно, чтобы мог образоваться третий химический элемент, называются *композиционными*.

Матрицей называется тот компонент композиционного материала, которого больше, другие называются *армирующими*. Среди композиционных существенное место занимают порошковые материалы.

Порошковые материалы всегда дороже литых (компактных) материалов с аналогичным химическим составом. Порошковые изделия хорошо работают в узлах трения. Из порошков можно сделать такие композиции, которые невозможно получить в виде расплава или литого компактного материала. Порошковые изделия могут иметь и другие специальные служебные свойства.

К основным материалам, используемым при производстве порошковых деталей, относятся порошки металлов и сплавов, к вспомогательным – смазывающие вещества, которые должны обеспечить хорошую уплотняемость порошковой смеси, часто называемой шихтой. В качестве смазочного материала чаще всего применяют порошок стеарата цинка. Свойства основных материалов зависят от их химического состава и способа получения.

Большинство изготавливаемых в мире порошковых деталей относится к материалам на железной основе.

При изготовлении порошковых деталей из железа, легированного другими материалами, применяют два способа: перемешивание различных порошковых компонентов (железной основы и легирующих элементов), уплотнение смеси и превращение смеси в сталь в результате металлургических процессов, протекающих при ее спекании; использование порошков, полученных размельчением заготовок из легированной стали, их уплотнение и спекание. В первом случае сплав называют негомогеннолегированным, во втором – гомогеннолегированным.

При применении первого способа можно достигнуть более высокой плотности изготавливаемой порошковой детали, но исключить неоднородность состава порошковой стали не удается. При изготовлении порошков вторым способом имеет место более высокая твердость частиц, что ухудшает уплотняемость смеси, но достигается структурная однородность материала.

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 то же время специалисты по обработке металлов давлением имеют возможность создавать такие схемы деформирования засыпанной в матрицу порции порошка, при которых все частицы принимают лепешкообразную или нитеобразную формы для порошков с различными исходными формами частиц. Таким образом, технологическая наследственность, связанная с методом получения железного порошка, может быть исправлена.

Чаще всего применяются следующие способы получения металлических порошков: 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 основной промышленный выпуск железных порошков распылением приходится на Сулинский завод [34].

При получении порошков железа методами восстановления сырьем служат оксиды железа или его хлористое соединение $FeCl_2$. 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 получения, 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 – γ = 2,4 г/см^3, обозначение такого порошка – ПЖВ2.160.24. Если марка ПЖР – это распыленный воздухом железный порошок, а ПЖВ – распыленный водой.

В промышленности часто используют 3 и 4 чистоту порошка. Порошки с марками RZ и WPL – иностранные аналоги отечественных порошков.

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.

Предварительная термическая или механическая (либо та и другая) обработка порошков применяется для изменения их физических характеристик и в ряде случаев сочетается 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 смешения 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).

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 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 [37] .

Порошковые материалы на железной основе могут быть углеродистыми (в зависимости от содержания углерода – низко-, средне- и высокоуглеродистые) или легированными (низколегированные, легированные или сложнолегированные).

Для обозначения марок порошковых конструкционных материалов на железной основе разработана система, в которой использованы принципы действующей маркировки сталей, производимых традиционными методами. В то же время введены обозначения, характерные для порошковых конструкционных материалов (метод производства изделий и их плотность).

Марку порошкового конструкционного материала 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. 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^3); 2 – пористость 15…10 % (плотность 6,7…7,1 г/см^3); 3 – пористость

9…2 % (плотность 7,15…7,70 г/см^3); 4 – пористость менее 2 % (плотность более 7,70 г/см^3). Буква «А» после цифры указывает на повышенное качество материала.

Наиболее распространенным для железных порошков является легирование углеродом, под действием которого изделие приобретает способность закаливаться.

Комплекс механических характеристик изделия включает в себя характеристики прочности: предел прочности σ_B, предел текучести $\sigma_т$; характеристики пластичности: относительное удлинение, % – δ; относительное сужение площади поперечного сечения, % – ψ; ударная вязкость – КС. Чтобы деталь хорошо работала, необходимо, чтобы она обладала одновременно высокой прочностью и высокой пластичностью.

Изделия из легированных порошков имеют следующие механические характеристики.

При добавлении не более 0,2 % углерода от массы порошка предел прочности $\sigma_B = 120$ МПа, относительное удлинение при испытании образца на разрыв $\delta = 8\,\%$, ударная вязкость КС = 350 кДж/м^2. При добавлении 0,8… 1,1 % углерода $\sigma_B = 200$ МПа, $\delta = 4\,\%$, КС=220 кДж/м^2.

У спеченного брикета путем закалки можно повысить σ_B до 350 МПа, но при этом δ снижается до 2 %. Указанные характеристики относятся к образцам, имеющим остаточную пористость 10…15 %.

При уплотнении до пористости 2…4% спеченный порошок имеет $\sigma_B = 450$ МПа, $\delta = 10\,\%$, КС= 450 кДж/м^2.

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.

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 НВ 120…127.

Молибден при введении его в порошковую шихту является сильным карбидообразующим элементом. Он повышает прочность, но снижает пластич-

ность 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 подвергаются термообработке.

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: $\sigma_B = 600$ МПа, $\delta = 10\,\%$, КС = 150 кДж/м^2, а после закалки приобретают: $\sigma_B = 1200$ МПа, $\delta = 5\,\%$, КС = 120 кДж/м^2.

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^2.

Ограниченное применение марганца в качестве легирующего элемента в порошковой металлургии связано с большой трудностью восстановления его из окислов. Спекание содержащих марганец порошковых композиций требуется проводить при температурах 1200…1300 °С. Совместное легирование марганцем и хромом существенно изменяет механические характеристики детали. Сталь, содержащая 0,6 % углерода, 2 % марганца и 2 % хрома, имеет прочность 780 МПа, $\delta = 12\,\%$, КС = 700 кДж/м^2.

При производстве порошковых изделий используются все известные методы термической обработки. В то же время термическая обработка порошковых изделий имеет некоторые особенности, обусловленные наличием пористости и в некоторых случаях неравновесностью структурного состояния. 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. Поэтому масло как закалочная среда рекомендуется только при производстве деталей из легированных сталей с низкой критической скоростью закалки.

Нагрев под закалку пористых деталей рекомендуется проводить в защитной от окисления среде. Температура нагрева под закалку для порошковых углеродистых сталей превышает критическую точку Ac_3 на 50…80 °С. В качестве закалочной среды применяют воду или водные растворы солей. Температура нагрева под закалку для низколегированных сталей превышает критическую точку Ac_3 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 Ac, а при охлаждении Ar. В частности, Ac_1 – температура превращения перлита в аустенит при нагреве, Ar_1 – температура превращения аустенита в перлит при охлаждении. Ac_3 – температура окончания растворения феррита в аустените при нагреве, Ar_3 – температура начала выделения феррита из аустенита при охлаждении.

Феррит – твердый раствор $Fe\alpha$ (C), аустенит – твердый раствор $Fe\gamma$ (C), перлит – механическая смесь феррита и цементита, цементит – химическое соединение Fe_3C.

Порошковые стали более чувствительны к термическим напряжениям, чем литые. В результате этого закалка в воде может привести к образованию трещин, поэтому приходится применять меры предосторожности. 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.

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.

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

Следует отметить, что при пористости порядка 15 % легирование углеродом, никелем, медью, хромом и фосфором не позволяет получить порошковые стали высокой прочности и пластичности. Ввиду этого при получении порошковых сталей с заданным уровнем механических свойств в первую очередь необходимо обеспечивать высокие значения плотности.

Для изготовления порошковых заготовок с высокой плотностью следует применять специальные технологические приемы, обеспечивающие сдвиги слоев металла в формуемой заготовке.

Если в контейнер засыпать порошок и не прикладывать силы, то он уложится с плотностью $\gamma = 2{,}8$ г/см^3 (рис. 26, слева). Следовательно, засыпная высота l_0 в 2.5 раза превышает высоту уплотненного брикета l.

Прессы для производства порошковых материалов должны иметь большой ход подвижных частей и большое штамповое пространство, поскольку высота изделия в 2,5 раза меньше засыпной высоты.

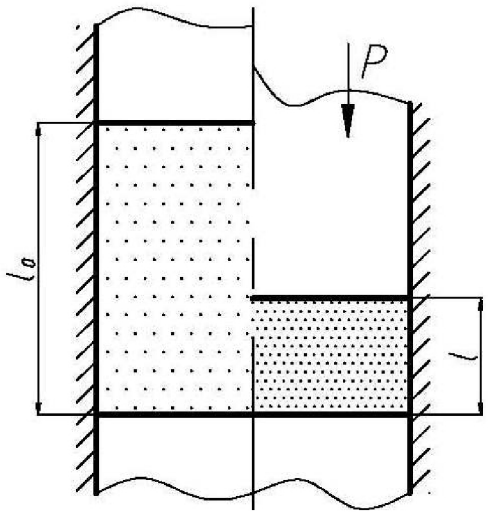


Рис. 26. Схема уплотнения засыпанного порошка в закрытой матрице

При уплотнении засыпанного порошка в закрытой матрице (рис. 26) прикладываемая удельная сила (давление) – 6…8 т/см^2 (600…800 МПа). Если удельная сила меньше 6 т/см^2 или больше 8 т/см^2, то после нагружения цельной детали не получается. При указанных давлениях (600…800 МПа) изделие имеет остаточную пористость 15…18%. Из-за остаточной пористости не получают комплекс механических характеристик, включающий в себя высокие прочность и пластичность.

Причина разрушения при давлениях свыше 800 МПа показана на рис. 27. Образующиеся макропоры оказывают сопротивление уплотнению. Они, как все арочные конструкции, очень устойчивы к действию сжимающих напряжений p. Раньше, чем эти поры закроются, под действием p на поверхности пор зарождаются трещины, и заготовка разрушается.

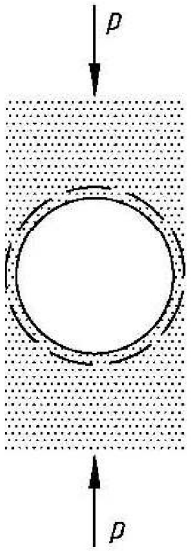


Рис. 27. Образование микротрещин в порошковой заготовке вокруг показанной сферой поры

При такой остаточной пористости никакие легирующие добавки практически не оказывают влияния на качество детали. Эффект легирования проявляется при пористости < 5% (в меньшей степени и при < 10%).

С целью повышения плотности окончательной детали сначала формуют цилиндрические заготовки, потом спекают их и используют спеченные заго-

товки как отрезанные от прутка заготовки в операциях обычной штамповки (технология штамповки из спеченных заготовок). Возможна и горячая объемная штамповка (ГОШ), и холодная объемная штамповка (ХОШ) порошковых заготовок. Однако при горячей штамповке, если она ведется на обычных прессах, имеет место большой отход (снижение КИМ), окисляются поверхности детали и отдельных порошинок, что снижает комплекс механических характеристик изделия.

Спекание всегда ведут в печах с защитной или восстановительной атмосферой. В качестве защитной используют азот, аргон, эндогаз. В качестве восстановительной атмосферы – водород или диссоциированный аммиак.

В газостатах всегда защитная атмосфера и высокая температура. Происходит ГОШ и достижение 100% спекания.

Плюсы восстановительной атмосферы: высокое качество порошковых заготовок.

Минусы восстановительной атмосферы: взрывоопасность, экологическая вредность.

Спекание производят при высокой температуре, не достигающей однако температуры плавления основного компонента смеси. Спекание чистых металлов производится в большинстве случаев при температуре около 0,67…0,8 их абсолютной температуры плавления ($T_{пл}$), сплавов – в ряде случаев при температурах несколько выше точки 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 °С применяют электрические печи сопротивления, до 1200 °С – газовые печи, до 1300 °С – 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). При спекании заготовки остаточная пористость изменяется незначительно. Проведенное исследование по спеканию заготовок из железного порошка ПЖВ4.160.28 в среде водорода при температуре 1200 °С при варьировании времени спекания от 1 до 3 ч показало, что остаточная пористость δ (%) в зависимости от времени t (ч) изменяется по закону $\delta = 20 - 1{,}4\,t$. Процессы рекристаллизации при спекании порошковых металлов протекают при более высоких температурах (обычно 0,6…0,8 $T_{пл}$), чем при термической обработке деформированных компактных металлов (обычно 0,4 $T_{пл}$).

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 вы-

годнее увеличения его длительности. Скорость уплотнения при спекании обычно в довольно значительных интервалах времени обратно пропорциональна длительности спекания.

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 исходных металлов и от того, как происходили уплотнение и нагрев. Процесс диффузии идет во времени τ, с увеличением температуры T и давления p время процесса уменьшается, как это описано Б.Д. Копыским.

Этот 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 в нужный момент.

Порошковые стали могут быть гомогенно легированными и негомогенно легированными.

Гомогенно легированные получены путем превращения в порошок стального слитка.

Негомогенно легированные получены путем смешения железного порошка (основы) с добавками порошков легирующих элементов. Смешение производят в смесителях барабанного типа, которые вращаются со скоростью порядка 60 об/мин, продолжительность смешения от 20 мин до 3…4 ч. Порошковая смесь, полученная в смесителе, называется *шихтой*. В шихту всегда добавляют смазочный материал (порошок парафина, стеарат цинка). Стеарат цинка добавляют в объеме 0,5…1 % по массе шихты. Если даже чистый Fe порошок (без легирующих добавок) перемешивается со стеаратом цинка, то это тоже называется шихтой. Из шихты в матрице формуют заготовки и спекают их. Чтобы шихта превратилась в порошковую сталь, необходимы температура T = 1200…1250 °С и большая продолжительность спекания, иногда t = 3…4 ч. При таком спекании негомогенно легированная сталь приблизится по свойствам к гомогенно легированной.

При производстве деталей из чистого железа можно применить холодную объемную штамповку, используя спеченную заготовку простой формы как обычную компактную заготовку, отрезанную от прутка. Если заготовка из легированной стали, то возникают проблемы, имеющие место при холодной объемной штамповке компактных стальных заготовок (из литых материалов). Основная проблема – это настолько большие удельные силы, действующие на инструмент, что инструмент не может осуществить формоизменение заготовки и разрушается. При лучших современных инструментальных сталях удельная сила, действующая на инструмент, не должна превышать 2500 МПа (250 кг/мм^2). Возможность деформирования заготовки зависит от напряжения σ_s. При этом σ_s – напряжение текучести, меняется в зависимости от упрочнения материала.

Для определения σ_s порошковых заготовок могут использоваться различные методы.

Один из методов – воспользоваться методикой расчета удельной силы осадки порошковой заготовки в закрытой матрице. При этом формула осадки сложнее формулы Зибеля $q = \sigma_s(1 + \mu d/3h)$. В данном случае формула Зибеля записана, чтобы продемонстрировать способ определения σ_s: напряжение текучести умножено на скобку. Далее удельная сила определяется экспериментально. Потом экспериментально определенную удельную силу приравнивают к удельной силе, рассчитанной теоретически: $q_э = q_т$, и далее решают уравнение в виде $\sigma_s = q_э / (1 + \mu d/3h)$.

Если получен отрицательный результат относительно возможностей холодной объемной штамповки (ХОШ) заготовки, то её пытаются штамповать с нагревом, однако нагрев свыше 600 °С приводит к окислению не только внешней поверхности заготовки, как у компактных материалов, но и к окислению поверхности зерен. Поэтому горячую объемную штамповку (ГОШ) порошковых заготовок используют очень редко, за исключением штамповки в газостатах. Поскольку заготовки простейшей формы, применяемые для последующей пластической деформации, имеют пористость, равную 15…18 %, при производстве из них деталей методом ХОШ можно достичь плотности 95…98 % от теоретической плотности материала ($\gamma_{железа}$ = 7,85 г/см^3). При ГОШ можно достичь плотности 100 %, но при этом окисляются частицы.

С проблемой уменьшения удельных сил при штамповке спеченных порошковых заготовок можно справиться путем проведения деформирования с активным действием сил контактного трения. На рис. 28 приведена схема штамповки спеченной порошковой заготовки в плавающей матрице.

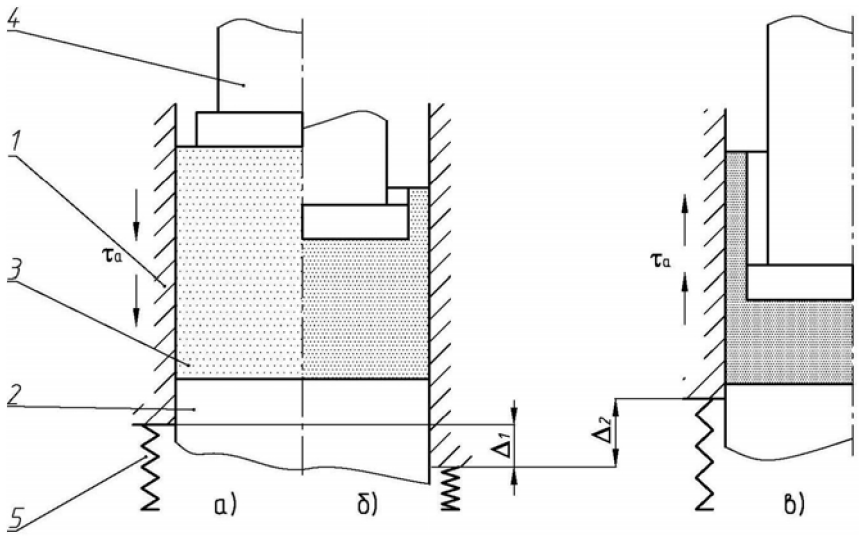


Рис. 28. Схема уплотнения порошковой заготовки в плавающей матрице:
а) осадка; б) начало выдавливания; в) окончание выдавливания: *1* – матрица; *2* – нижний пуансон (выталкиватель); *3* – спеченная порошковая заготовка; *4* – пуансон; *5* – пружина, расположенная под нижним торцом

На начальной стадии (рис.28, *а*) пуансон *4* уплотняет спеченную порошковую заготовку *3*, высота заготовки уменьшается. При этом вследствие трения на поверхности контакта заготовки с матрицей матрица перемещается вниз на расстояние Δ_1, и сила трения τ_a способствует лучшему уплотнению заготовки. После того как заготовка уплотнилась, начинается вытекание материала (*б*). Сила трения между стенкой стакана и поверхностью полости матрицы направлена вверх (*в*) и способствует вытеканию материала из-под торца пуансона *4*. При этом матрица под действием сил трения τ_a поднимается на расстояние Δ_2. Сила пружин *5* незначительна, их назначение – только уравновесить массу матрицы. Перемещение матрицы происходит за счет сил трения по поверхности контакта матрицы с заготовкой. При этом удельная сила, действующая на пуансон *4*, может быть снижена на величину до 10 % по сравнению с выдавливанием в неподвижно закрепленной матрице.

Наличие пружины *5* отличает выдавливание в плавающей матрице спеченных порошковых заготовок от выдавливания компактных заготовок. Это связано с тем, что для лучшего уплотнения порошковой заготовки матрица на начальном этапе совершает перемещение вниз на Δ_1, а при штамповке компактных заготовок этого не требуется.

Кроме снижения удельной деформирующей силы выдавливание с активными силами контактного трения позволяет улучшить качество изготавливаемой детали.

Для уменьшения пористости стенки изделия при выдавливании на прессе, показанном на рис. 15, матрицу вначале принудительно перемещают в том же направлении, в каком движется формирующий полость пуансон. При этом создают силами трения дополнительное препятствие течению материала в стенку стакана, (рис. 29). Только после того, как будет исключена пористость заготовки, матрицу направляют в сторону течения материала в стенку стакана, разгружая пуансон при деформировании заготовки.

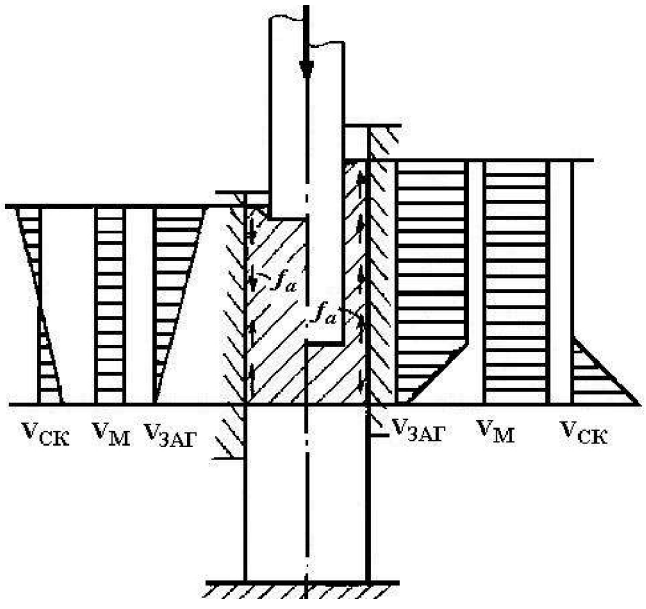


Рис. 29. Выдавливание с активными силами трения стаканов из спеченных порошковых заготовок

На рис. 30 видно, что вначале выдавливания пуансон выполняет только небольшую наметку полости на верхнем торце заготовки, после чего происходит осадка заготовки, при которой исключается остаточная пористость в материале. После завершения выбора остаточной пористости, когда заготовка становится практически компактной, пуансон продолжает свое внедрение в заготовку и из нее выдавливается стакан. Такое формоизменение особенно важно для увеличения плотности стенок стакана в их верхней части. Если бы на начальном этапе выдавливания не создавали бы силы трения, препятствующие вытеканию заготовки в стенку, то пуансон внедрялся бы в заготовку, не осаживая ее, и верхняя часть стенки стакана имела бы почти такую же остаточную пористость, как в исходной заготовке, т.е. 13-15%.



Рис. 30. Поэтапное формоизменение спеченной порошковой заготовки при выдавливании из нее стакана при активном действии сил трения

В результате получают деталь с высокой равномерной плотностью (рис. 31).

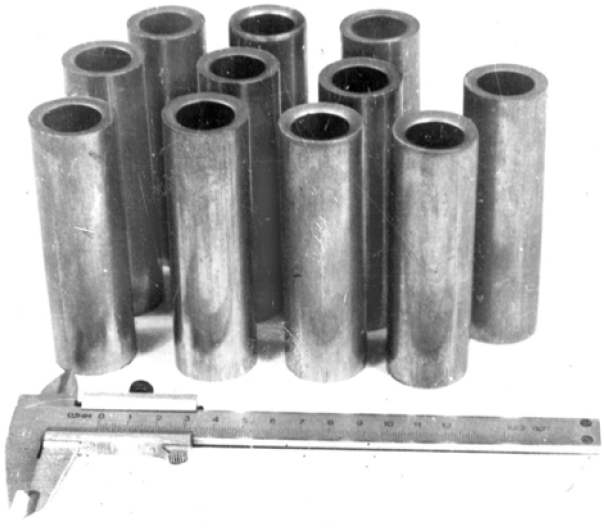


Рис. 31. Стаканы, изготовленные выдавливанием из спеченных порошковых заготовок

Кривая усталостной прочности. По ней можно определить, во сколько раз увеличится стойкость пуансона при снижении удельной силы выдавливания, например на 10 %, (рис. 32).

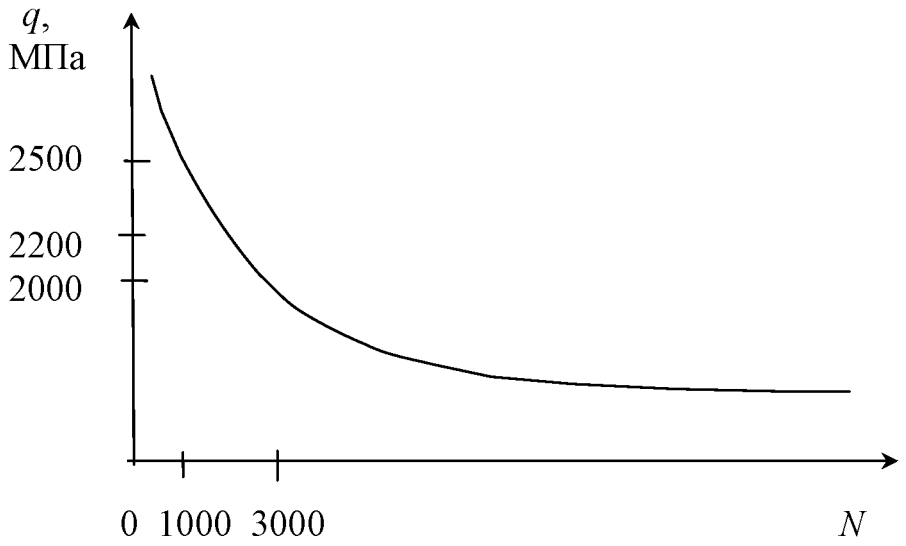


Рис. 32. Кривая усталостной прочности пуансонов: q - удельная сила; N - количество циклов, которые может выдержать инструмент

Выдавливание в плавающей матрице может быть осуществлено в обычных штампах, если в контейнере с матрицей сверху и снизу последней предусмотреть свободное пространство, чтобы матрица могла перемещаться в осевом направлении. При этом, если выдавливанию подвергается пористая заготовка, матрица должна быть подпружинена снизу, как было показано на рис. 28.

Конструкция штампа усложняется не столько из-за движения матрицы, сколько из-за проблем, связанных с опорой нижнего пуансона на нижнюю плиту штампа. В штампе с неплавающей (обычно закрепленной) матрицей применяется приведенная ниже конструкция (рис. 33).

Поскольку $q \leq 2500$ МПа, а σ_T нижней плиты штампа равна 150… 200 МПа, $D \geq 4d$, прокладка *3* должна быть выбрана из таких соображений, чтобы уменьшить давление на нижнюю плиту примерно в 15 раз. А сам выталкиватель *2* в данной конструкции опирается на закаленную вставку матрицы. При выдавливании в плавающей матрице такую опору осуществить нельзя.

При выдавливании в плавающей матрице удельная сила снижается на 5…10 %.

В то же время, если осуществить принудительный привод матрицы с правильно подобранной скоростью (контролируемой), можно снизить удельную силу q на пуансоне на величину до 30…35 %. Для выдавливания с принудительным приводом матрицы применяется пресс (или штамп с автономным приводом), приведенный на рис. 15.

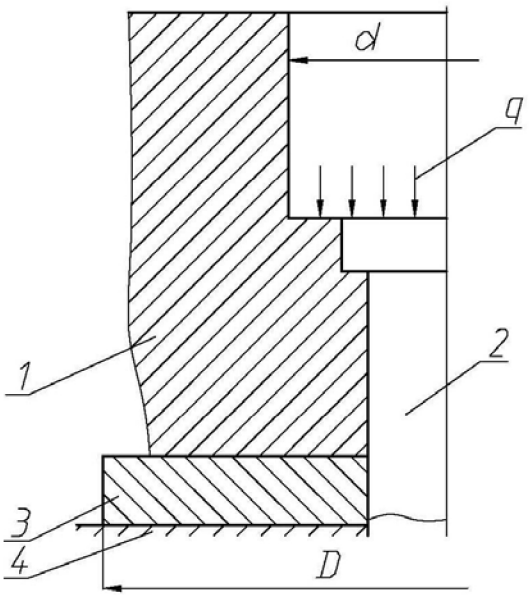


Рис. 33. Опора нижнего пуансона о матрицу в штампах с неплавающей (жестко закрепленной) матрицей: *1* - матрица; *2* - выталкиватель; *3* - прокладка; *4* - плита

В случае производства деталей из порошков эффективность этого устройства увеличивается по сравнению с выдавливанием из компактных материалов. При ХОШ для деталей из компактных материалов в качестве смазочного материала используют фосфатирование заготовок и омыливание. Коэффициент трения снижают до $\mu = 0{,}07\ldots0{,}08$. При выдавливании спеченных порошковых заготовок фосфатирование и омыливание применять нельзя, поскольку если пористую заготовку опустить в ванну с раствором, то она впитает этот раствор, и потом при штамповке этот раствор из нее течет (выдавливается). Раствор пробивает каналы в заготовке (прочности не будет никакой), поэтому порошковые заготовки смазывают пастой – дисульфида MoS_2. На поверхность заготовки изнутри выходят несмазанные частицы, поэтому $\mu = 0{,}2$. При этом возрастает эффект штамповки с активными силами трения.

Снижение q на пуансоне позволяет осуществлять штамповку легированных спеченных порошковых заготовок.

Возможно проведение поверхностного легирования спеченной заготовки с целью повышения механических характеристик поверхностного слоя (рис. 34). Заготовку *2* помещают в матрицу *5*. Заготовка опирается на подпружиненный плунжер *3*. Диаметр заготовки d_3 немного меньше (на 0,5…1 мм), чем d – диаметр нижней части полости матрицы. Верхний пуансон *4* имеет посадку по поверхности верхней части полости матрицы. Между заготовкой *2* и внутренней поверхностью верхней части полости матрицы засыпают композицию *1*, состоящую из стеарата цинка, графита и др. (все порошки). При опускании пуансона *4* заготовка проталкивается в нижнюю часть полости матрицы, а уплотняемый порошковый материал, который окружал заготовку,

создает на поверхности заготовки слой обмазки. Далее эти заготовки поступают на операцию ХОШ, при которой действуют удельные силы 2000… 2500 МПа, и материал обмазки вдавливается в поры в поверхностном слое заготовки. При этом очень хорошо снижается μ. Для лучшего протекания процесса целесообразно подогревать матрицу до 250…300 °С. Поскольку после штамповки детали производится термическая обработка для снятия остаточных напряжений, то в процессе этой обработки происходит взаимодействие легирующих элементов и материала основы (железо), и на поверхности получается порошковая сталь.

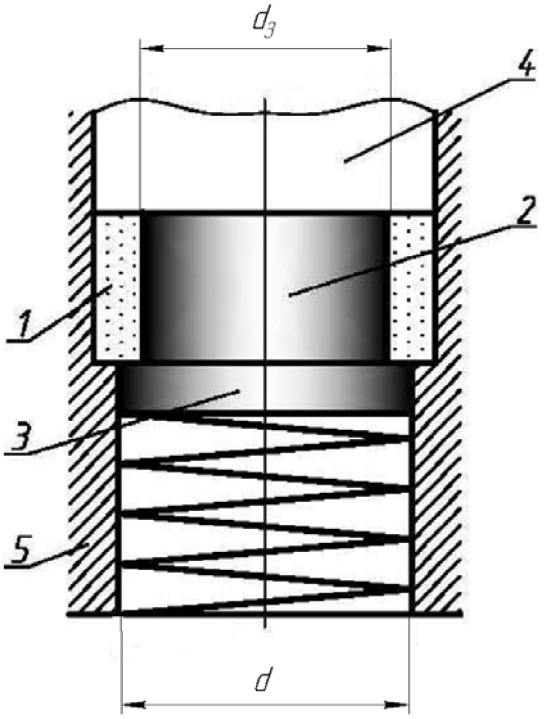


Рис. 34. Схема нанесения обмазки на поверхность заготовки

По этому методу были изготовлены детали из железного порошка, легированного следующими компонентами: 0,6 % C; 1 % Ni; 2 % Mn; 3 % Cu. Удельная сила последующей штамповки такой заготовки выдавливанием составила: q = 2350 МПа.

3.3. Производство высококачественных деталей из порошковых сталей

К реализации операций формования заготовок порошковых деталей сложных форм, когда необходимо создание комбинированного нагружения заготовки, имеют место два подхода. Первый – использование существующих прессов и применение штампов специальных конструкций, создающих комбинированное нагружение заготовки. Второй – создание специализированных прессов, имеющих приводы механизмов, перемещающих с требуемыми силами и рабочими ходами инструменты для заданного нагружения и деформирования заготовки. Первый подход реализуют японские фирмы Kotaki, Yoshisu-

ka, фирма Mannesmann-Pulvermetall (ФРГ) и др. Сторонники второго подхода – специалисты фирмы Bolding Lima Hamilton (США) – считают, что максимальное число независимых движений пресса позволяет значительно расширить его технологические возможности и упростить конструкцию штамповых инструментов [21, 27, 28].

В России идут по второму пути, создавая пресс-автоматы с рядом независимых движений. Однако технические характеристики этих пресс-автоматов: высоты засыпных камер, ходы рабочих органов по отношению к номинальной силе пресса таковы, что на этих пресс-автоматах целесообразно изготавливать только плоские детали. Для изготовления высоких деталей приходится создавать сложные штампы к универсальным гидравлическим прессам, имеющим большие ходы ползуна, или разрабатывать новые конструкции специализированных прессов.

В настоящее время работами Дж. Барка, В. Вейса, С.С. Кипарисова, Б.Д. Копыского, А.Г. Овчинникова, А.М. Дмитриева показано, что для получения высокоплотных изделий из железных порошков и порошковых сталей необходимо осуществлять деформирование в условиях, при которых реализуется эффект сдвигов между зернами [35].

При формовании деталей непосредственно из легированного железного порошка с последующим спеканием необходимы меньшие удельные силы, чем при выдавливании спеченных порошковых заготовок. Однако при достижении относительной плотности, равной 83…88 % от плотности компактного материала, в заготовке образуются расслойные трещины. Такие трещины не «залечиваются» при дальнейшем деформировании. Невысокая плотность деталей не позволяет использовать преимущества легирования.

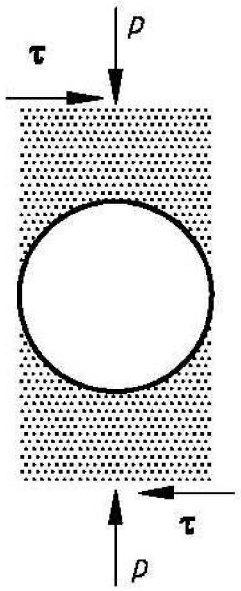


Рис. 35. Закрытие показанной сферой поры при приложении к заготовке сдвигающих напряжений τ

Для получения высокоплотных деталей непосредственно из порошковой шихты необходимо осуществлять деформирование в условиях, при которых в заготовке происходят интенсивные сдвиги между частицами (рис. 35).

Если кроме давления p приложить сдвигающее напряжение τ, пора легко закроется и перепрессовочных трещин не будет.

Наиболее надежно чистую поверхность частиц можно получить при их сближении благодаря растяжению поверхности контакта. Хрупкие пленки при растяжении поверхности частиц лопаются, и в трещины выходят свежие неокисленные объемы металла, которые и участвуют в диффузии.

Метод дает возможность повышения легирования сталей, изготовления деталей из любых композиций, при этом удельная сила на инструменте не превышает 1000 МПа ($q \leq 1000$ МПа).

Для формования порошковой детали со сдвигом частиц относительно друг друга применяют штампы, конструкция которых схематично представлена на рис. 36.

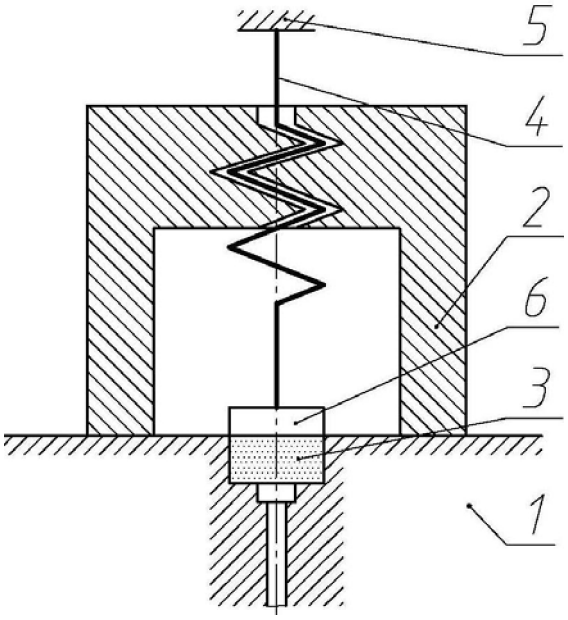


Рис. 36. Штамп для нагружения заготовки осевым сжатием и сдвигом

Нижняя плита *1*, в которой размещена матрица с засыпанным порошком, установлена на столе пресса. Гайка *2* также опирается на стол пресса. На винт с пуансоном *6* на нижнем торце и антифрикционной прокладкой *4* на верхнем торце сверху действует ползун пресса. Изготовленная деталь выталкивается из матрицы выталкивателем *5*. Угол наклона винтовой пары – 18^{o} и более, иначе потери в резьбе будут очень большие и винт не будет проворачиваться.

Недостатки: строго фиксированное соотношение поступательного и вращательного движений инструмента, очень большие потери силы пресса от трения. При силе пресса 500 кН на заготовку передается не больше 250… 300 кН. Значительно более рациональной является конструкция устройства, показанного на рис. 37.

К ползуну *1* пресса прикреплена гайка *2*. Внутри гайки *2* находится винт *3* с пуансоном на нижнем торце. Порошковая заготовка *4* находится в матрице в полости нижней плиты штампа *7*. Между верхним торцом винта и ползуном пресса размещен упругий элемент *6*. Выталкиватель *5* служит для извлечения изделия из матрицы. Если пружину *6* убрать, то осевая сила будет определяться трением в резьбе винтовой пары.

Достоинства: вся сила пресса (500 кН) передается на порошковую заготовку, а соотношение между поступательным и вращательным движениями пуансона будет зависеть от жесткости упругого элемента *6* при постоянном угле наклона винтовой пары.

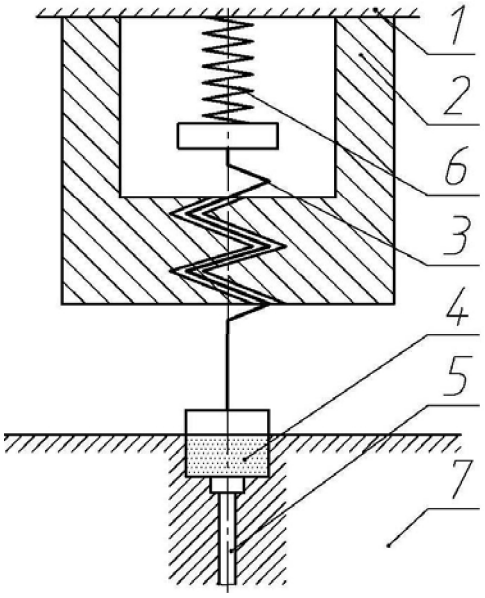


Рис. 37. Штамп усовершенствованной конструкции

Соотношения осевого напряжения σ_n и напряжения сдвига τ, позволяющие обеспечить γ=7,1 г/см^3, относительная плотность приблизительно 91%, показаны на рис. 38.

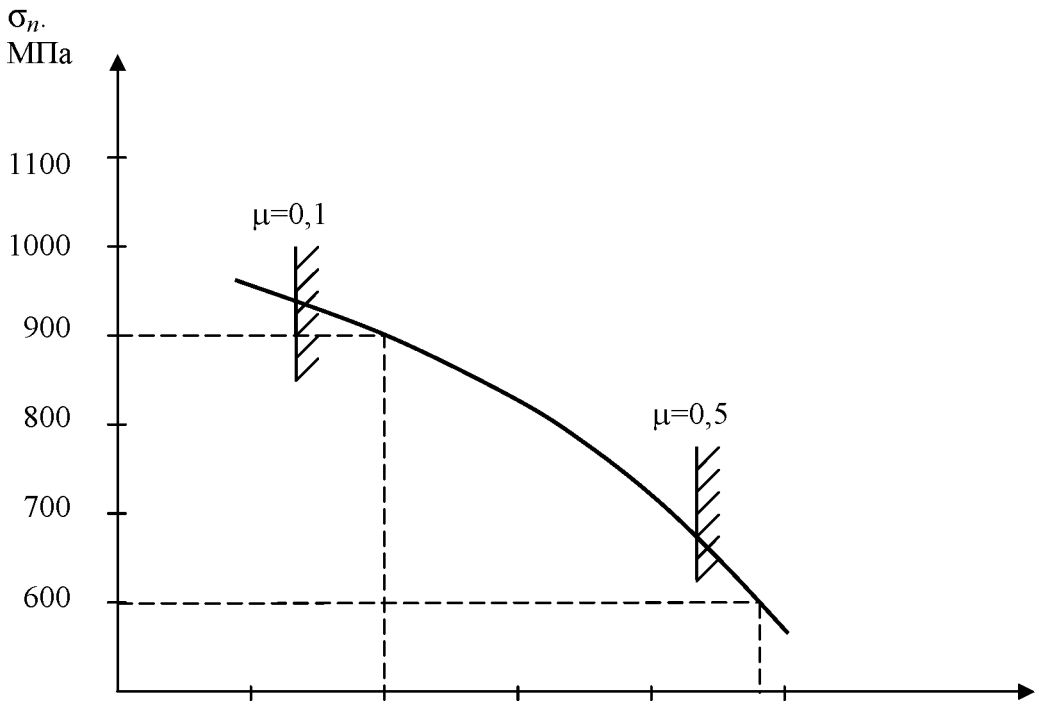


Рис. 38. Соотношения напряжений σ_n и τ, позволяющие обеспечить одинаковую плотность заготовки из порошка ПЖВ2.160.28

Аналогичные кривые можно построить для других плотностей деталей.

На рис. 39 приведена конструкция штампа, позволяющая при использовании лишь одной пары винт – гайка с несамотормозящей резьбой получать винтовое перемещение пуансона с различными углами подъема.

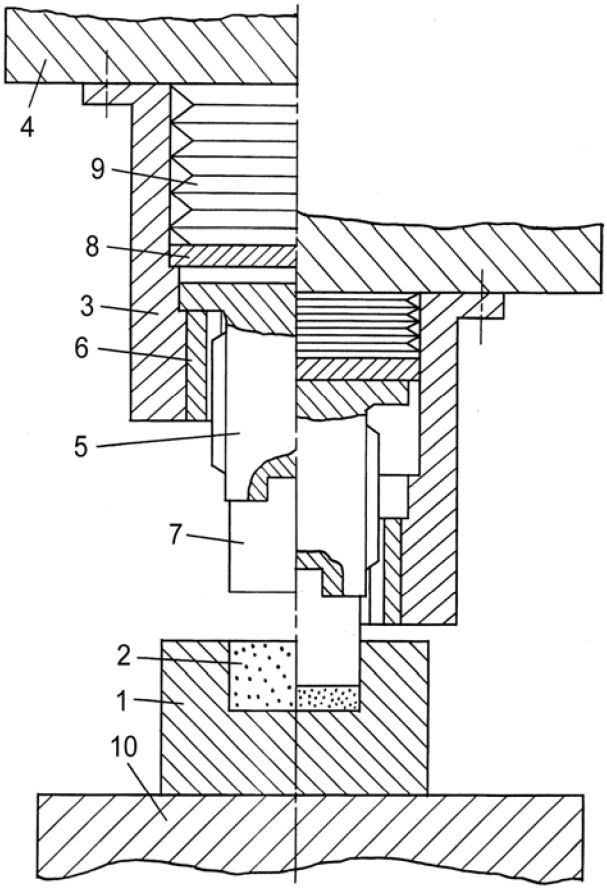


Рис. 39. Конструкция штампа для уплотнения заготовки поворачивающимся пуансоном

Штамп содержит корпус *1* с полостью *2* для порошка, траверсу *3*, закрепленную на верхней плите *4*. В полости траверсы *3* размещена винтовая пара: винт *5*, гайка *6*, причем гайка *6* закреплена в траверсе *3*, а винт *5* в начальном положении удерживается от выпадения из гайки *6* при помощи своего фланца. На нижнем торце винта 5 закреплен пуансон *7*. Внутри траверсы *3* с первоначальным зазором относительно верхнего торца винта *5* расположена ограничительная плита *8*, над которой размещен упругий элемент *9*, предварительное сжатие которого осуществляется при закреплении траверсы *3* к верхней плите *4* и регулируется толщиной ограничительной плиты *8*.

Штамп работает следующим образом. После засыпки порошка в полость *2* корпуса *1* верхняя плита *4* с траверсой *3*, гайкой *6*, винтом *5*, опирающимся в первоначальном положении своим фланцем на торец гайки, и пуансоном *7* движется вниз. При соприкосновении пуансона *7* с порошковой заготовкой винт *5* начинает перемещаться относительно гайки *6*, совершая вынужденное вращательное движение. При этом происходит подравнивание верхнего слоя порошка под действием веса вращающегося винта и пуансона. После того, как верхний торец винта упирается в ограничительную плиту, он перестает вращаться и, перемещаясь совместно с траверсой *3* и гайкой *6*, производит формование порошка. Как только сила на верхнем торце винта 5 станет больше силы предварительного сжатия упругого элемента *9*, винт *5* перемещается

вместе с ограничительной плитой *8* относительно гайки *6* в траверсе *3*, в результате чего окончательное формование осуществляется при осевом перемещении пуансона *7* с одновременным его вращением.

При этом соотношение вращательного и поступательного перемещений пуансона (рис. 40) зависит не только от угла подъема резьбы пары винт – гайка, но и от жесткости применяемого упругого элемента. Это дает возможность совершать пуансоном винтовое движение с углами подъема, намного меньшими предельных для несамотормозящей резьбы.

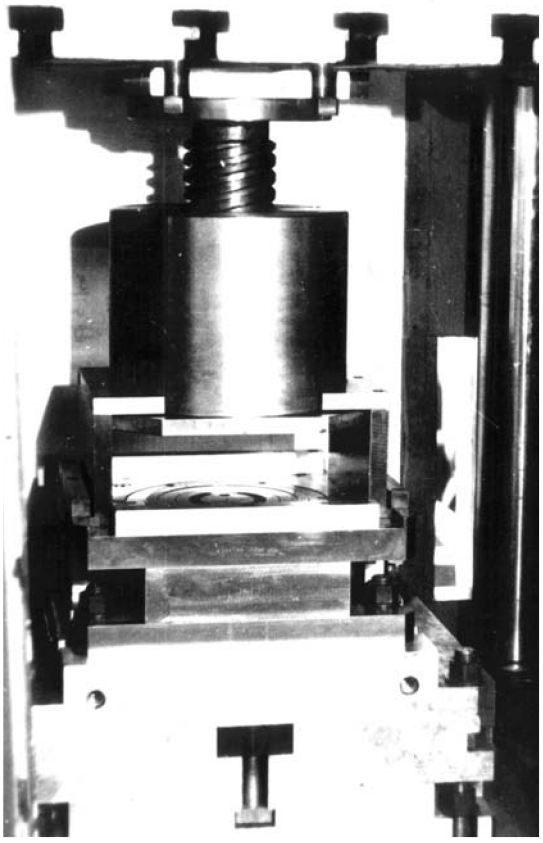


Рис. 40. Штамп для формования порошковых деталей поворачивающимся пуансоном

По окончании формования заготовки при обратном ходе верхней плиты *4* ограничительная плита *8* и винт 5 под действием упругого элемента и сил тяжести возвращаются в первоначальное положение и, продолжая подниматься вместе с траверсой *3* и гайкой *6*, освобождают формованную деталь, которая извлекается из корпуса *1* при помощи выталкивателя.

При эксплуатации описанного штампа возникали трудности с возобновлением при каждом рабочем цикле смазки в зазорах в резьбе между винтом и гайкой, а также между верхним торцом винта *5* и ограничительной плитой *8*. Поэтому, несмотря на большой опыт, накопленный в научной школе, к которой относятся авторы, по созданию машин с винтовым приводом, в дальнейшей своей работе авторы предпочли применять описываемые в данном разделе прессы, не использующие винтовой привод.

3.4. Формование конических втулок

Возможно уплотнение заготовок на универсальных прессах до плотности 0,91…0,95 от теоретической плотности материала. Это относится к деталям с конической внешней поверхностью (рис.41).

Как правильно расположить показанную на рис. 41 деталь в штампе: как показано на рис. 42 или на рис. 43 ?

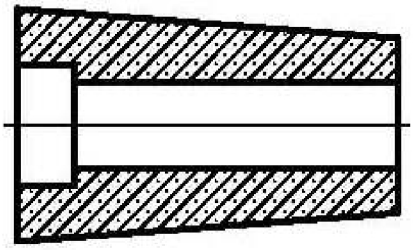


Рис. 41. Порошковая деталь с конической внешней поверхностью

Если деталь расположить, как показано на рис. 42, при уплотнении образуется тромб *5*, при дальнейшем повышении давления возникают перепрессовочные трещины вверху тромба, а внизу порошок остается неуплотненным. Поэтому общее правило: при работе с порошковыми материалами необходимо, чтобы под действием приложенной силы материал перемещался в расширяющуюся часть матрицы.

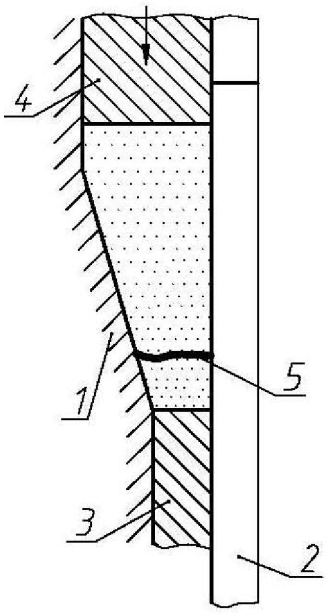


Рис. 42. Вариант расположения порошковой детали в штампе:
1 - матрица; *2* - оправка; *3* - выталкиватель; *4* - пуансон; *5* - граница тромба

Согласно схемам на рис. 43 порошок засыпается через верхнее отверстие полости матрицы. При этом порошковый материал легко заполняет расширяющуюся полость. После заполнения порошком всего объема полости мат-

рицы оправку перемещают вверх выталкивателем пресса (рис. 43, *а*). Под действием сил контактного трения и благодаря наличию уступа на оправке порошок хорошо заполняет узкую часть полости матрицы. При этом засыпное отверстие полости матрицы перекрывается оправкой. На следующем этапе осевая сила передается на матрицу (рис. 43, *б*).

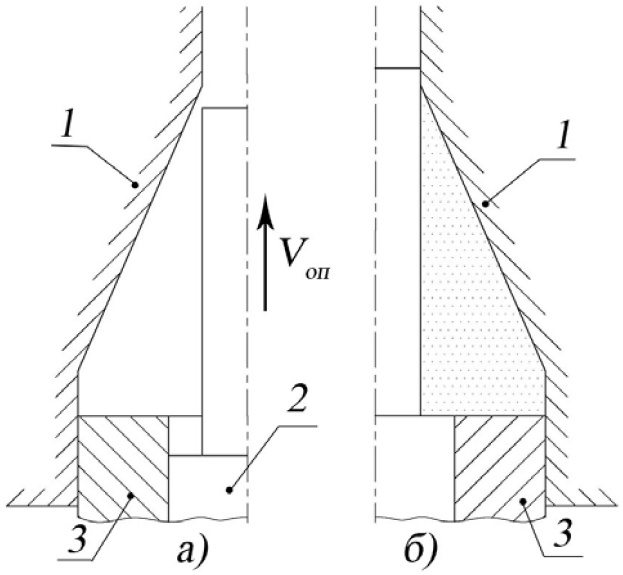


Рис. 43. Вариант расположения и уплотнения порошковой детали в штампе:
а – начало уплотнения, *б* – окончание уплотнения; *1* - матрица;
2 - оправка со ступенью; *3* - пуансон

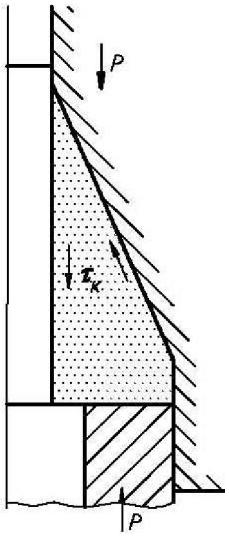


Рис. 44. Схема действия сдвиговых напряжений $\tau_к$ при уплотнении по схеме на рис. 43

При таком уплотнении на заготовку действуют напряжения $\tau_к$ (рис. 44). За счет $\tau_к$ в материале заготовки возникают сдвиговые напряжения, что приводит к закрытию пор и отсутствию перепрессовочных трещин. Можно создать большие осевые давления, превышающие 1000 МПа, для уплотнения железного порошка при отсутствии перепрессовочных трещин. Характерно, что наибольшая плотность достигается в самой тонкой части стенки втулки (это самое главное, т.к. потом втулка идет на спекание, а после спекания толстую часть можно доуплотнить штамповкой).

В развитие способов формования порошковых заготовок при создании активных сдвигов между частицами заготовки предложена схема, приведенная на рис. 45. Формование по этой схеме осуществляется с помощью штампа, сходного с описанным в разделе 1 и показанного на рис. 3.

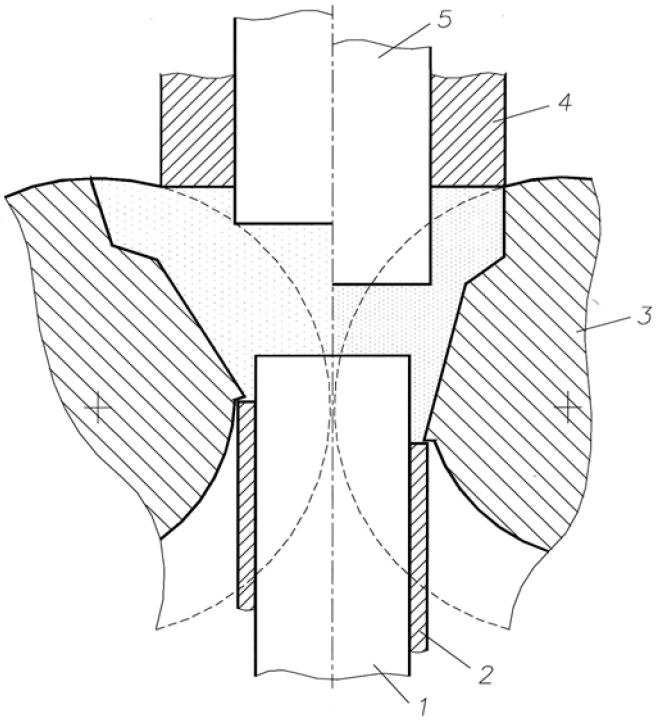


Рис. 45. Формование порошковой заготовки в матрице, образованной вальцами

Формование производится одновременно сближающимися пуансоном *5* и оправкой *1* и поворачивающимися вальцами, в которых выполнена полость с заданным профилем. При принудительном повороте вальцов *3* от ползуна пресса объем этой полости уменьшается и происходит формование порошковой детали. В рассматриваемом способе привод вальцов может быть осуществлен аналогично описанному в разделе 1. Втулочный пуансон *2* формует нижний торец детали, а втулочный пуансон *4* – верхний торец.

3.5. Производство длинномерных (прутковых) изделий из металлического порошка

В предыдущих разделах рассматривалось производство деталей ограниченной длины из железного порошка. В связи с большой уплотняемостью порошка из большой порошковой заготовки удается изготовить невысокое изделие.

Технологи пытаются на уплотненную заготовку засыпать новую порцию порошка. В этом случае сращивания заготовок не произойдет. Попытки сделать торец пуансона рельефным, чтобы следующая порция порошка попала во впадины торца предыдущей заготовки, также не позволили достигнуть хорошего соединения заготовок по их границе.

В технологических процессах производства длинномерных изделий применяют способы, описанные ниже. Схема формования согласно одному из них приведена на рис. 46.

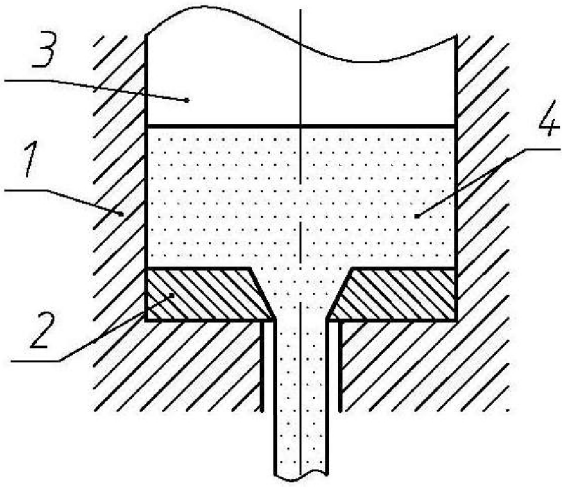


Рис. 46. Мундштучное формование: *1*- контейнер; *2* - матрица; *3* - пуансон; *4* - порошковая заготовка

При этом в качестве смазки применяют материалы, которые одновременно выполняют функцию клея, например, клейстер. Также каучук, растворенный в бензине. Подчеркнем, что это связующее наносится не на место контакта двух порций порошка, о которых говорилось ранее, а вводится в порошковую шихту. Из этой шихты формуют длинномерное изделие.

Другой способ формования приведен на рис. 47.

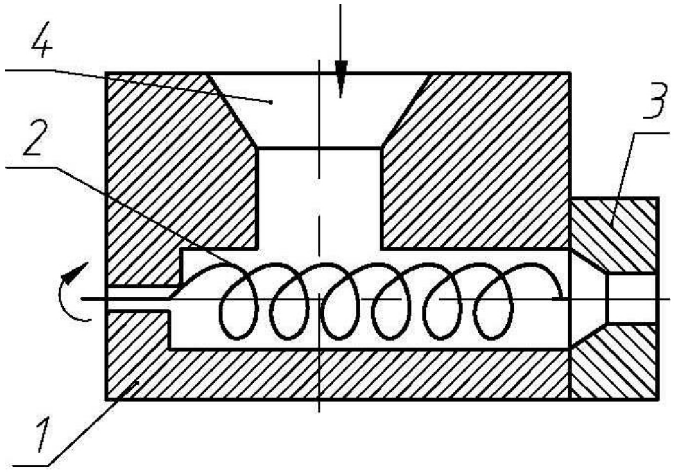


Рис. 47. Формование вращающимся шнеком: *1* - контейнер; *2* - шнек; *3* - матрица; 4 - воронка для засыпки порошка

Недостатками формования с использованием в качестве пластификатора клейстера или растворенного в бензине каучука являются следующие:

– удаление пластификатора при спекании заготовки сопровождается сильным газовыделением;

– после испарения пластификатора изготовленное изделие имеет существенную пористость.

В современных технологиях хорошее соединение на контакте между отдельными участками заготовки получают с помощью формования, сопровождающегося интенсивными сдвигами между элементами заготовки.

Один из способов создания сдвигов при формовании длинномерных изделий приведен на рис. 48. Способ относится к изготовлению длинномерных заготовок при добавлении порошка в матрицу отдельными дозами. В этом случае при уплотнении без сдвигов заготовка распадается на отдельные столбики, соответствующие по массе каждой из засыпаемых доз порошка.

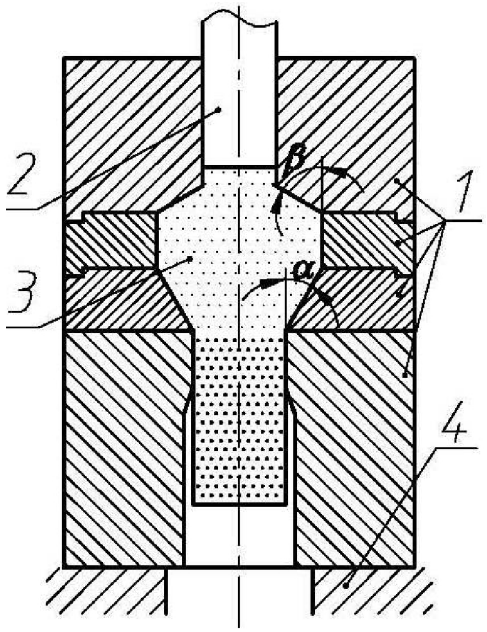


Рис. 48. Способ создания сдвигов в порошковой заготовке: *1* - сборная матрица; *2* - пуансон, продвигающий пористые порошки; *3* - заготовка; *4* - стол пресса; $\alpha = 10^{o}$, $\beta = 50^{o}$

При формовании со сдвигами после засыпания порошка пуансон уплотняет его. Уже уплотненный порошок продвигается к расширяющейся части матрицы, в которой частично сформованная заготовка разрушается и перемещается в расширенную часть матрицы.

В процессе формования порошок подходит к воронке и, проходя через воронку, он окончательно уплотняется. Прутки после спекания подвергают испытанию на излом. В местах разрушенных границ между засыпанными дозами прочность на границах всего на 20% ниже, чем в основном материале, и в 8 раз выше, чем при прессовании по схеме, когда не было применено описанного способа.

При необходимости изготовления изделий большой длины применяют конструкцию штампа, приведенную на рис. 49.

Достоинство: в отличие от схемы на рис. 48 создаются еще более интенсивные сдвиги, связанные с изменением течения металла с вертикального на горизонтальное.

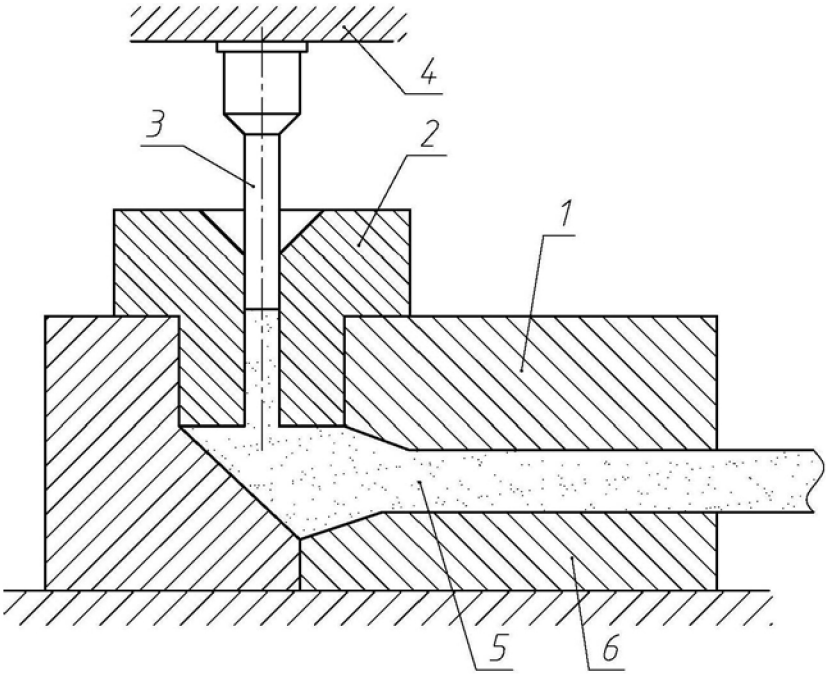


Рис. 49. Способ формования изделий большой длины при подаче порошка отдельными дозами: *1* – матрица; *2* – питатель с воронкой; *3* – пуансон; *4* – ползун пресса; *5* – изделие; *6* – стол пресса

Среди методов выдавливания в разъемную матрицу с созданием в заготовке интенсивных сдвигов отметим следующий (рис. 50, *а*) [48]. Согласно этому методу заготовку выдавливают из полости верхнего пуансона таким образом, чтобы она заполнила все пространство в разъемной матрице. Разъем нужен для последующего извлечения изделия (рис. 50, *б*).

Преимущества: при выдавливании из заготовки диаметром d_1 по сравнению с заготовкой диаметром d требуется меньшая деформирующая сила.

Недостатки: разъем надо было сделать по вертикали, а не по горизонтали.

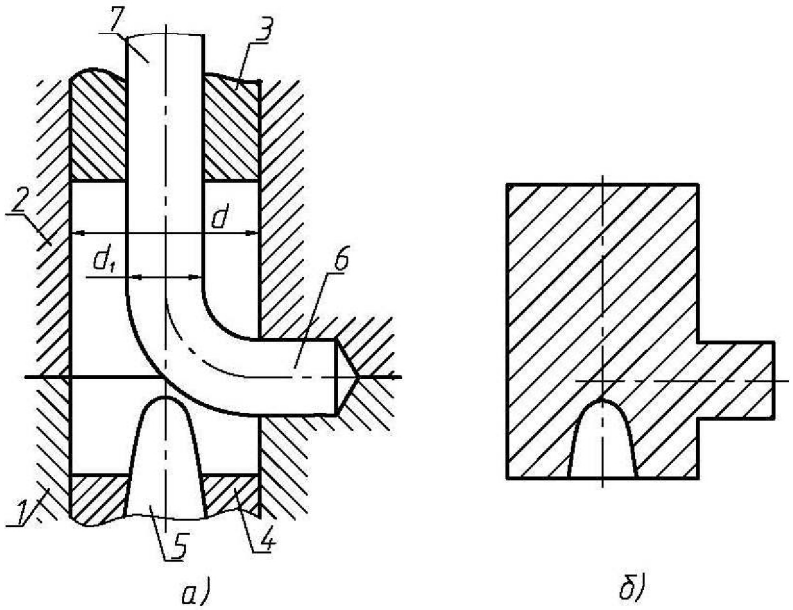


Рис. 50. Выдавливание изогнутой заготовки в разъемную матрицу: *1* – нижняя часть матрицы; *2* – верхняя часть матрицы; *3* –втулка для направления пуансона *7*; *4* – втулка для центрирования оправки; *5* – оправка, формирующая полость в детали; *6* – выдавливаемая заготовка

3.6. Формование высокоплотных порошковых деталей на прессах, создающих активные силы контактного трения

Формование высокоплотных деталей со сдвигом частиц может проводиться на прессах для выдавливания с активными силами контактного трения, конструкция которых представлена на рис. 15, 17, 18, 21.

Формование осевым сжатием с одновременным созданием в заготовке сдвигов слоев материала осуществляется на этих прессах по схеме, приведенной на рис. 50.

На первом этапе (рис. 51, *а*) осуществляется уплотнение порошка движением пуансона со скоростью $v_{\text{п}}$ с одновременной раздачей заготовки путем перемещения матрицы, имеющей ступенчатую рабочую полость, навстречу пуансону со скоростью $v_{\text{м}}$.

При раздаче создаются сдвиги слоев материала заготовки. На втором этапе (рис. 51, *б*) осуществляется обжим брикета по боковой поверхности перемещением матрицы со скоростью $v_{\text{м}}$ при воздействии силой $P_{\text{п}}$ со стороны верхнего пуансона.

При этом создаются дополнительные сдвиги слоев материала заготовки. При формовании по таким схемам достигается средняя плотность формованных деталей – 90 % и выше.

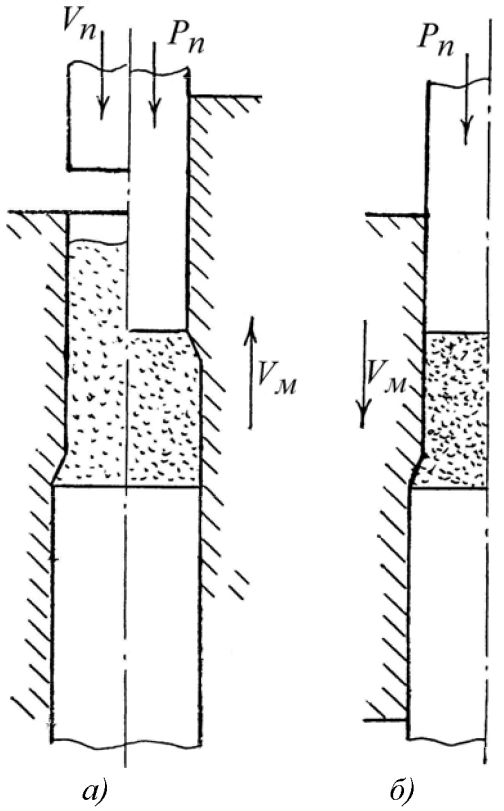


Рис. 51. Схема формования порошковой заготовки осевым сжатием с созданием сдвигов слоев материала

Для определения уплотняемости железных порошков при формовании с применением схем нагружения, реализующих существенные сдвиги в заготовке, исследованы зависимости плотности образцов от марки железного порошка, а также от процентного содержания пластификатора (стеарата цинка), схемы и удельной силы формования. Изделия формовали по двум схемам, предусматривающим сдвиги в образце в меньшей и большей степенях.

Первая схема деформирования включала формование брикета с одновременной его раздачей при перемещении из верхней цилиндрической полости матрицы диаметром 32 мм в нижнюю цилиндрическую полость диаметром 36мм, вторая – те же операции, что и первая, а затем обжатие брикета по боковой поверхности с диаметра 36 до 32 мм (рис. 51, *б*).

Давление на торце нижнего пуансона фиксировалось в конце формования (по второй схеме перед началом обжатия). В эксперименте давление задавали равным 300, 420 МПа (фактор X_2). В шихту добавляли 0,5 и 1 % стеарата цинка (фактор X_4). Использовали отечественные железные порошки ПЖВ2.160.28 и ПЖВ4.160.28, полученные методом восстановления, и порошки ПЖРВ2.200.26 и ПЖРВ3.200.26, полученные распылением водой, а также порошок WPL-200 (Mannesmann Demag) и порошок ULTRAPAC-LE (Mannesmann Demag) [57]. В проведенном исследовании порошкам (фактор X_1) присвоены следующие условные значения уровней: ПЖВ2.160.28 – 0, ПЖРВ2.200.26 – 1, ПЖРВ3.200.26 – 2, ПЖВ4.160.28 – 3, WPL-200 – 4, ULTRAPAC-LE – 5. Механическим схемам деформирования (фактор X_3) присвоены условные значения: схема со значительным сдвигом – 1, с незначительным – 0.

Формованные детали спекали в среде водорода при температуре 1150 ^{0}C в течение одного часа. Было получено следующее уравнение регрессии для плотности г/см^3:

$$\gamma = 4{,}7 - 2{,}38\,X_1 + 0{,}0031\,X_2 + 1{,}66\,X_3 + 0{,}3684\,X_4 + \\ + 3{,}95\,X_1^2 - 2{,}303\,X_1^3 + 0{,}5447\,X_1^4 - 0{,}04455\,X_1^5. \qquad (1)$$

Проведенное исследование показало, что технологическая наследственность, связанная с методами получения порошков, существенно влияет на их уплотняемость. При одинаковых силах формования и режимах спекания наибольшей уплотняемостью обладает порошок ULTRAPAC-LE, относительная плотность образцов из которого выше относительной плотности образцов из порошков WPL-200 и ПЖВ2.160.28, плотность последних соответственно на 6…7 и 2…3 % выше плотности образцов из распыленных порошков ПЖРВ2.200.26 и ПЖРВ3.200.26. Наименьшей плотностью обладают образцы из порошка ПЖВ4.160.28.

На основании уравнения (1) построены графики, приведенные на рис. 52.

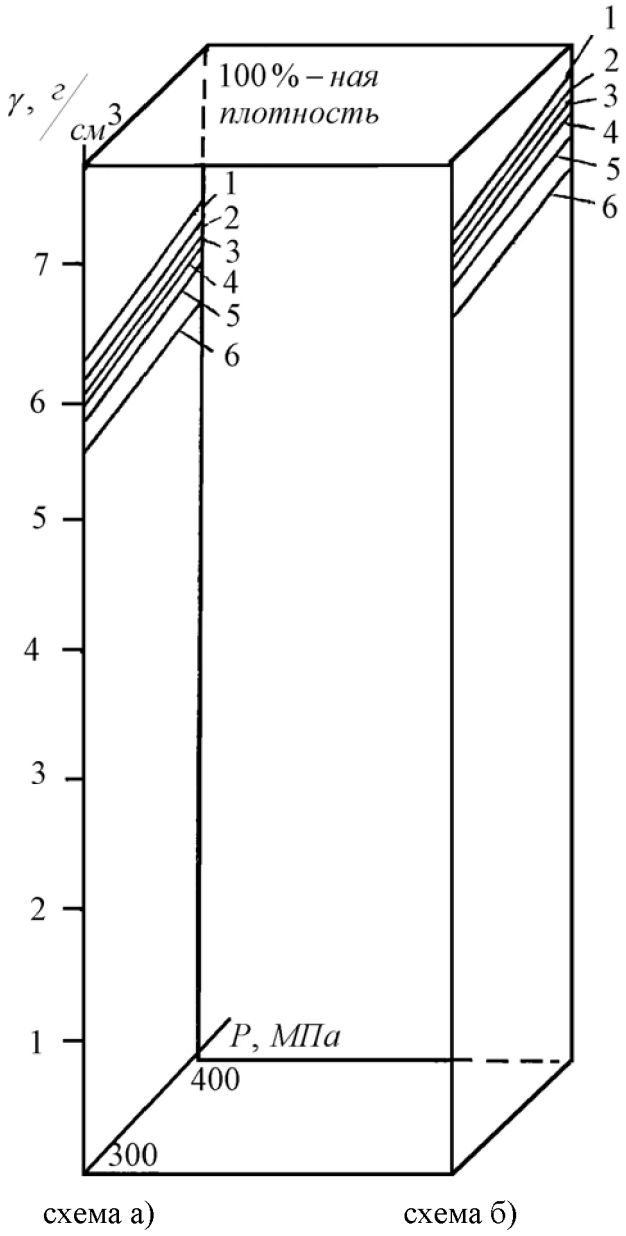


Рис. 52. Достигаемые плотности заготовок в зависимости от удельной силы *p* на торце пуансона перед началом создания сдвигов и от вариантов деформирования в соответствии с рис. 51: при 1 % содержании стеарата цинка для следующих марок железных порошков: 1 – ULTRAPAC-LE, 2 – WPL-200, 3 – ПЖВ2.160.28, 4 – ПЖРВ2.200.26, 5 – ПЖРВ3.200.26, 6 – ПЖВ4.160.28

Независимо от порошка проведение формования по схемам, обеспечивающим значительные сдвиги частиц в заготовке, позволяет повысить плотность деталей на 1 г/см^3, т.е. примерно на 15 %.

Конструкция наиболее компактного и многофункционального из прессов для рассмотренных технологий схематично изображена на рис. 53.

Этот пресс, кроме холодного выдавливания с активными силами трения, предназначен для формования высокоплотных стаканов из железного порошка. В прессе главный гидроцилиндр *1* 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. 53 – правая половина).

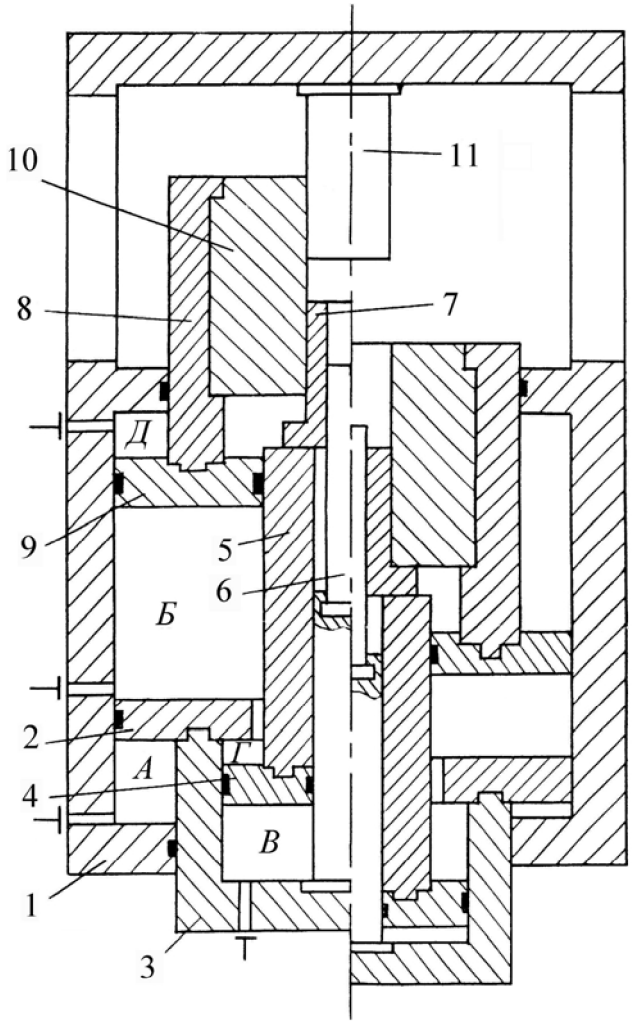


Рис. 53. Компактный многофункциональный гидропресс

При рабочем ходе вначале подается жидкость в полость *Б*, при этом полость *Д* соединяется со сливом, а входы в полости *А* и *В* закрыты. Матрица *10* поднимается, и пуансон *11* закрывает ее горловину. Затем подают рабочую жидкость в полость *В*, при этом полость *Б* соединяют со сливом. Входы в полости *А* и *Д* закрыты. Пуансон *7* поднимается и уплотняет стенку формуемого стакана. После окончания уплотнения стенки подают рабочую жидкость в полость *Д*, при этом полость *Б* соединяют со сливом, а входы в полости *А* и *В* за-

крыты. При этом матрица перемещается вниз и активными силами контактного трения дополнительно уплотняет стенку формуемого стакана. Затем подают рабочую жидкость в полость *А* при соединенной со сливом полости *Б* и закрытых входах в полости *В* и *Д*. 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 этого пресса является его работа от одного насоса. В конструкциях, показанных на рис. 15, 17, 18, 21, малые габариты прессов недостаточно ощущаются из-за массивных гидроприводов (см. рис. 19).

Таким образом, современные технологические процессы производства высококачественных деталей из металлических порошков обеспечены прессовым оборудованием, производимым отечественными и зарубежными предприятиями.

Схема формования стакана с созданием сдвигов в материале заготовки на гидропрессах рассматриваемого типа выглядит следующим образом (рис. 54).

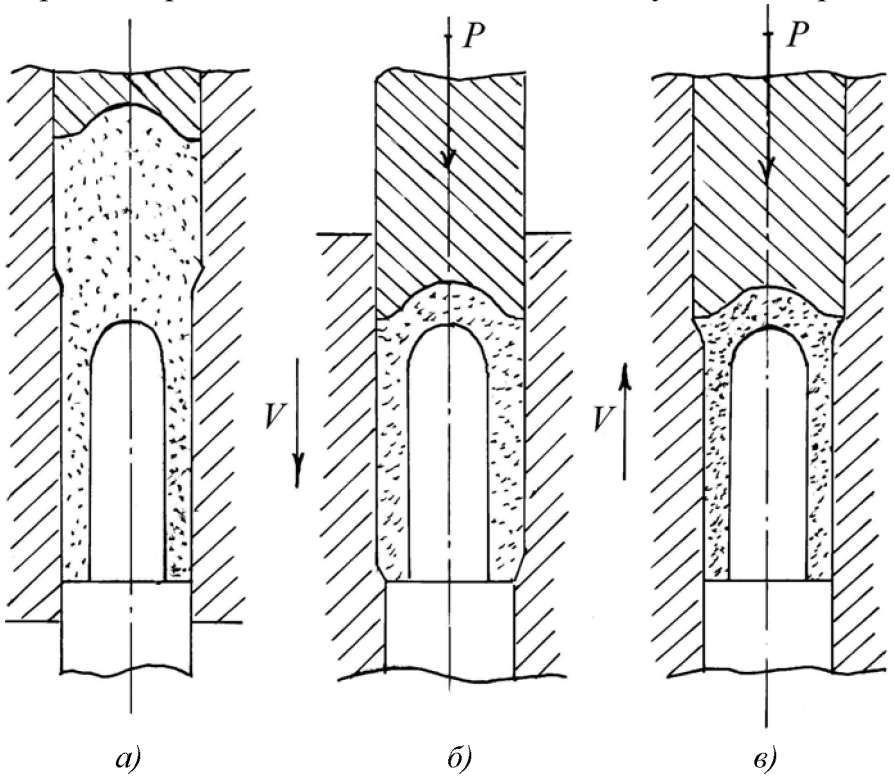


Рис. 54. Схема формования стаканов с созданием интенсивных сдвигов в материале порошковой заготовки

Стаканы 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

матрица перемещается вниз (рис. 54, *а*), при этом засыпную полость образует участок 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. 54, *б*), при этом сформованный на первом этапе стакан перемещается в участок полости матрицы меньшего диаметра. В результате происходит дополнительное уплотнение стенок стакана (рис. 54, *в*). На донную часть заготовки постоянно действует сила, создаваемая верхним пуансоном.

Ниже приведены фотографии (рис. 55, 56) некоторых деталей, изготовленных на созданных и описанных выше прессах с использованием описанных схем деформирования.



Рис. 55. Порошковые втулки с тонкой стенкой из ПЖВ2.160.28



Рис. 56. Порошковые втулки со ступенчатой фланцевой частью из ПЖРВ3.160.24

3.7. Производство нанопорошковых заготовок

Среди сформулированных Правительством РФ приоритетных направлений развития науки на ближайшие годы ведущее место занимают наноматериалы и нанотехнологии. Это направление, интенсивно развивающееся в мировой науке и практике в последнее десятилетие и часто называемое технологией XXI века, не является абсолютно новым для обработчиков давлением. Мы, в отличие от физиков, материаловедов и представителей других научных направлений, технически подготовлены к производству наноматериалов в промышленном масштабе.

Приставка "нано" означает – одна миллиардная часть (1 нанометр (нм) = $=10^{-9}$ м). Под термином "нанотехнология" понимают создание и использование материалов, структура которых регулируется в нанометровом масштабе, т.е. в диапазоне размеров атомов и молекул.

Исследования последних лет продемонстрировали важную роль наноструктур в различных областях науки и техники. Характерные размеры элементов структуры нанообъектов лежат в диапазоне 10^{-9} - 10^{-7} м, соответствующем средним размерам атомов и молекул в обычных материалах. Нанотехнологический подход означает целенаправленное регулирование свойств объектов на молекулярном уровне. Придавая материалам и системам принципиально новые качества, нанотехнология может обеспечить прогресс практически во всех существующих областях деятельности.

Наночастицами считают такие, у которых доля поверхностных атомов превышает 10% от их общего количества. Поверхность является "стоком" большинства дефектов кристаллической структуры почти бесконечной емкости. В результате выхода дефектов на поверхность структура внутри зерен приближается к классической структуре монокристалла.

Формирование нанокристаллических структур позволяет получать конструкционные материалы с уникально высокими свойствами. Например, их микротвердость в 2-7 раз выше, чем твердость крупнозернистых аналогов, причем это не зависит от метода получения материала. Прочность нанокристаллических материалов при растяжении в 1,5-2 раза выше, чем у крупнозернистых аналогов. Для больших зерен рост прочности и твердости при уменьшении их размера обусловлен введением дополнительных границ зерен, которые являются препятствиями для движения дислокаций. При малых наноразмерных зернах рост прочности происходит благодаря низкой плотности имеющихся дислокаций и трудности образования новых [26].

Для керамических нанокристаллических материалов обнаружена повышенная пластичность при низких температурах, ее можно использовать в промышленных процессах экструзии и прокатки. Для всех наноматериалов имеет место увеличение теплоемкости с уменьшением размера зерна, но наибольший ее прирост наблюдается для наноматериалов, полученных формова-

нием порошков. Коэффициент объемного термического расширения увеличивается с уменьшением размера зерна. Коэффициент граничной диффузии в наноматериалах значительно выше, чем в крупнозернистых, что позволяет легировать их нерастворимыми или слаборастворимыми при обычных условиях элементами за счет более развитой зеренной структуры.

Развитие науки о наноматериалах и нанотехнологиях произошло таким образом, что первыми о разработке этой проблемы сообщили физики и материаловеды [3, 9].

Физики пошли по пути конструирования новых материалов, совершенствования их структуры и свойств, создания наноматериалов и наносистем на основе молекулярной архитектуры, что неразрывно связано с применением адекватных (атомного разрешения) диагностических средств. Рентгеновские методы сыграли ключевую роль в развитии современной науки о материалах. Однако применение рентгеновского излучения для анализа наноматериалов и наноструктур связано с решением ряда сложных задач в области физики рассеяния рентгеновских лучей. В настоящее время эти проблемы находятся в стадии их успешного решения.

Что касается металловедов, то в их работах по технологии наноматериалов ключевую позицию заняли методы интенсивной пластической деформации (ИПД). При этом они "открыли" способы равноканального углового (РКУ) прессования и уплотнения заготовки пуансоном, совершающим одновременно поступательное и вращательное движения. Во-первых, не можем не отметить, что эти методы были открыты специалистами в области обработки давлением на десятилетия раньше [32, 42]. Во-вторых, у обработчиков давлением создано и работает в промышленности оборудование для реализации этих методов [50].

Многие "старые" научно-технические направления вливаются в современное понятие "нанотехнологии". Такие методы получения консолидированных наноструктурных материалов, как порошковая технология, консолидируемая кристаллизация из аморфного состояния, ИПД и технология нанесения наноструктурных покрытий и пленок также относятся к нанотехнологии [29].

Многие технические решения в «доперестроичный» период развития отечественной науки не опубликованы широко, поскольку они имели оборонное предназначение. Поэтому до настоящего времени для получения наноматериалов не нашла применения и достаточного литературного освещения схема, приведенная на рис. 51. Эта схема имеет существенные преимущества по сравнению с вновь "открытыми" материаловедами схемами ИПД: равноканальным угловым прессованием и уплотнением заготовки пуансоном, совершающим одновременно поступательное и вращательное движения. Основное преимущество – возможность создания простого и надежного прессового оборудования.

Такое оборудование создано и описано выше в настоящем издании.

4. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

4.1. Штамповка в гидростатах

4.1.1. Цель создания и конструкции гидростатов

Поскольку существует проблема прочности инструмента во время штамповки труднодеформируемых материалов (W, Mo и т.п.), было предложено производить штамповку не воздействием пуансона на заготовку, а воздействием жидкости высокого давления. Это возможно реализовать созданием гидростатов. При этом, чтобы составить конкуренцию штамповке стальным инструментом, способ обработки в гидростатах должен обеспечивать давление 2000-3000 МПа [11, 40].

При штамповке с использованием гидростатов возникают следующие трудности:

1) требуются уплотнения, препятствующие вытеканию рабочей жидкости в зазоры соединений в 100 раз более прочные, чем уплотнения в обычных гидропрессах;

2) необходим подбор жидкостей, которые не затвердевали бы при давлениях, создаваемых в гидростатах;

3) надо учитывать, что при давлениях выше, чем указанные величины, возникают существенные упругие деформации, в первую очередь контейнеров, а также других элементов гидростатов, рабочая жидкость под давлением уменьшает свой объем;

4) существенную роль играют технические решения по обеспечению прочности контейнеров, внутри которых находится рабочая жидкость.

Стандартных, серийно выпускаемых гидростатов нет. Один из созданных гидростатов схематично изображен на рис. 57.

Рассматриваемый гидростат располагают в штамповом пространстве пресса.

Помимо гидростатов, располагаемых в рабочем пространстве прессов, были созданы гидростаты с приводом от насосных станций и с использованием мультипликаторов для повышения рабочего давления до 2000…2500 МПа. Однако недостатком гидростатов с индивидуальными насосными станциями является необходимость создания трубопроводов, способных выдерживать чрезвычайно высокие давления. В связи с этим большинство гидростатов, которые были созданы, размещали в штамповом пространстве пресса и давление в контейнере создавали воздействием ползуна на плунжер. В дальнейшем мы рассмотрим устанавливаемый в штамповом пространстве пресса гидростат с двумя контейнерами. Необходимость таких конструктивных решений вызвана тем, что в простейшем варианте (изображенном на рис. 57) имеется недоста-

ток, связанный с ограниченными размерами штампового пространства пресса. Штамповое пространство пресса ограничивает габаритные размеры прессуемого изделия и величину рабочего хода плунжера *2* гидростата.

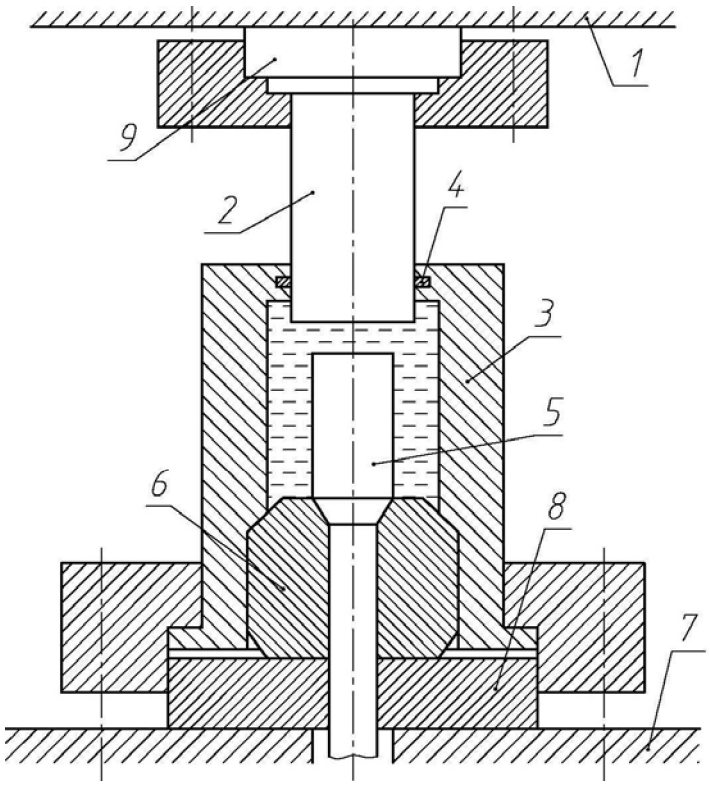


Рис. 57. Схема одной из конструкций гидростата: *1* – ползун пресса; *2* – плунжер; *3* – контейнер; *4* – уплотнение плунжера в контейнере; *5* – заготовка; *6* – матрица (коническая посадка); *7* – стол пресса; *8* – прокладка закаленная; *9* – прокладка закаленная (для снижения контактного давления в 15…20 раз)

К рабочим жидкостям предъявляются следующие требования:

1) не затвердевать при давлении до 2500 МПа;

2) обладать наименьшей сжимаемостью. Из-за сжимаемости жидкости эффективный рабочий ход гидростата сокращается. Это объясняется тем, что значительная часть рабочего хода гидростата расходуется на сжатие рабочей жидкости.

Предъявляемым требованиям хорошо отвечает жидкость, состоящая из глицерина и 30 % этиленгликоля.

Упругая деформация контейнера также способствует сокращению эффективного рабочего хода гидростата.

Для того чтобы жидкость могла сосредоточить в себе заданные (требуемые) давления, необходимо, чтобы в начальный момент прессования заготовка перекрывала отверстие матрицы. Поэтому заготовку всегда делают с заходным концом, назначение которого перекрыть отверстие в матрице и не допустить вытекание туда рабочей жидкости до достижения требуемого дав-

ления 2000…2500 МПа. После достижения требуемого давления рабочая жидкость начинает вытекать из матрицы вокруг выдавливаемого материала заготовки и создавать активные силы контактного трения. Поскольку жесткое трение между заготовкой и матрицей исключается и заменяется жидкостным гидростатическую обработку применяют для деформирования таких хрупких материалов, как W, Mo, Co.

Когда начинается вытекание жидкости в зазор между матрицей и заготовкой, давление в контейнере падает. Потом снова нарастает и снова падает (рис. 58). Такие колебания давления приводят к ступенчатому вытеснению заготовки из матрицы, что создает поперечные риски на поверхности изделия, и оно может треснуть.

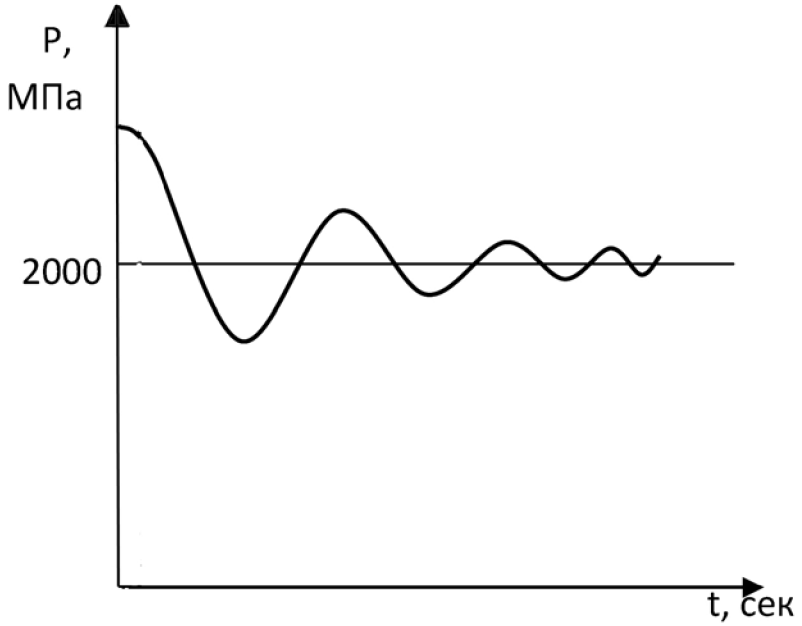


Рис. 58. Колебания давления при штамповке в гидростате

Способы снижения колебаний давления включают в себя повышение скорости прессования (до 0,02…0,025 м/с), уменьшение диаметра контейнера и применение комбинированных схем приложения к заготовке деформирующих сил.

Гидростатическое прессование применяют для заготовок, имеющих разное отношение их длины к диаметру. В частности, прессуют даже проволоку. Очевидно, что при этом невозможно создать давление, приложенное к торцу заготовки и таким образом проталкивающее проволоку через матрицу. Продвижение проволоки и ее пластическая деформация (утонение) осуществляется посредством жидкости, вытекающей из матрицы вокруг этой проволоки и создающей активные силы трения.

При прессовании проволоки особо важно не допускать колебаний давления в гидростате, поскольку проволока при этом разрушится.

Для радикального снижения колебаний давления применяют схемы с комбинированным нагружением заготовки (рис. 59, 60).

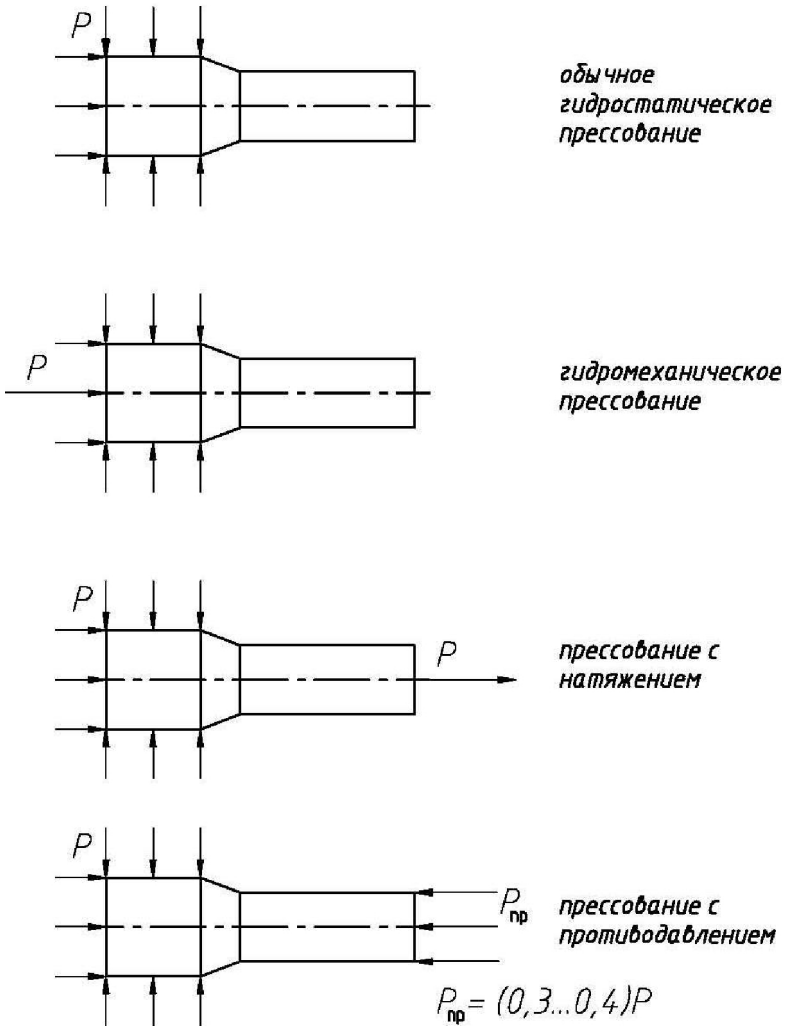


Рис. 59. Схемы прессования с комбинированным нагружением заготовки

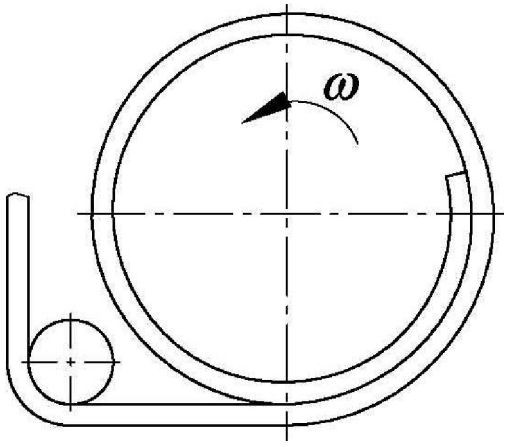


Рис. 60. Создание натяжения при прессовании проволоки

Верхняя схема на рис. 59 (обычное гидростатическое прессование) реализована в устройстве, показанном на рис. 57. В этом устройстве плунжер *2* не воздействует непосредственно на верхний торец заготовки *5*. На верхний торец заготовки давление передается через рабочую жидкость.

Если бы в устройстве, показанном на рис. 57, плунжер *2* давил бы на верхний торец заготовки непосредственно с силой *P* и при этом сохранялось давление через рабочую жидкость, то это было бы гидромеханическое прессование (вторая сверху схема на рис. 59).

Глядя на устройство на рис. 57 и представив себе описанный вариант гидромеханического прессования, понимаешь справедливость высказанного выше утверждения, что применение комбинированных схем приложения к заготовке деформирующих сил снижает колебание давления при штамповке в гидростате, изображенное на рис. 58.

Третья сверху схема на рис. 59 (прессование с натяжением) конструктивно предусматривает наличие устройства, тянущего за конец прессуемой заготовки, выходящий из матрицы. Пример такого устройства приведен на рис. 60. Однако, обсуждая третью сверху схему на рис. 59, заметим, что при прессовании проволоки давление на ее торец в полости контейнера не имеет существенного значения.

При гидростатическом прессовании проволоки в контейнер помещают катушку проволоки и на выходе получают проволоку меньшего диаметра. При этом проволока продвигается в матрице рабочей жидкостью, вытекающей вокруг боковой поверхности проволоки через зазор между поверхностями полости матрицы и проволоки.

После данных пояснений становится понятным, почему схема прессования с натяжением уменьшает колебания давления при штамповке в гидростате.

Схема прессования с противодавлением (четвертая сверху на рис. 59) предусматривает наличие у гидростата второго контейнера с жидкостью высокого давления, в полость которого выходит заготовка после прессования через матрицу. Таким образом, создается давление на торец участка заготовки, имеющего меньший диаметр после прессования.

После окончания прохождения заготовки *5* через матрицу в устройстве, показанном на рис. 57, не имеющем описанного дополнительного контейнера для создания противодавления, происходит прорыв жидкости (так называемый «выстрел»). Тогда вся накопленная вследствие деформирования контейнера энергия разряжается и заготовка выстреливается из матрицы с огромной скоростью. Для улавливания заготовки применяются, например, песок, вата. Однако изделия при таком торможении сильно искажаются.

С целью предотвращения «выстрела» на верхнем торце заготовки предусматривают выточки (рис. 61, *а*) или запирающий выходное отверстие контейнера шар (рис. 61, *б*).

Эффективным способом предотвращения «выстрела» заготовки является последовательное прессование нескольких заготовок (рис. 62).

Согласно схеме на рис. 62 заготовку прессуют на половину ее длины, затем открывают гидростат, на верхний торец недопрессованной заготовки устанавливают новую исходную заготовку (обеспечивая соосность вспомога-

тельной втулкой) и продолжают прессование до того момента, пока верхняя заготовка не примет форму изображенной на рис. 62 нижней. Затем на торец недопрессованной нижней заготовки устанавливают новую исходную и т.д.

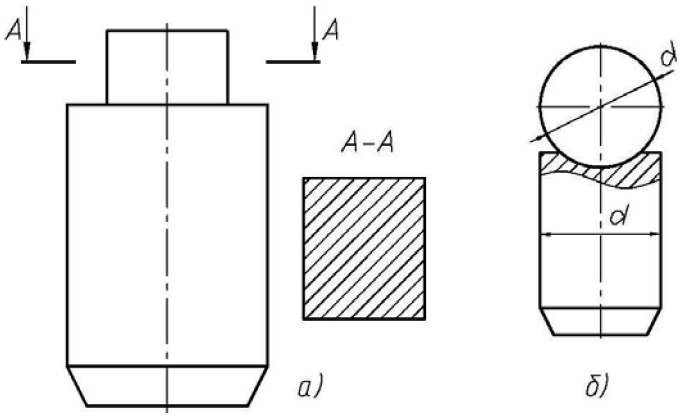


Рис. 61. Способы предотвращения "выстрела" заготовки: *а* – выточки на верхнем торце; *б* – запирающий выходное отверстие шар

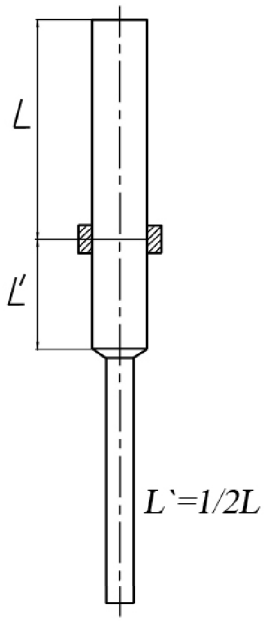


Рис. 62. Последовательное прессование нескольких заготовок

Для увеличения длины прессуемых заготовок при ограниченных размерах штампового пространства пресса, в котором размещен гидростат, используют гидростат с двумя гидроцилиндрами (рис. 63).

Такой гидростат позволяет прессовать заготовки значительно большей длины, чем гидростат вертикального исполнения.

Верхний контейнер *3* гидростата предназначен для создания давления жидкости, а нижний *4*, горизонтально расположенный и непосредственно (без трубопровода) соединенный с верхним контейнером, предназначен для прессования заготовки *8*.

На рис. 63 не показаны мощные стяжные шпильки, соединяющие главный гидроцилиндр *4* со станиной пресса и не допускающие смещения гидро-

стата вправо от станины *1*. Указанные стяжные шпильки имеют уступы с толщиной, равной толщине подвижного затвора *2*, не допускающие зажима и невозможности вертикального перемещения этого затвора.

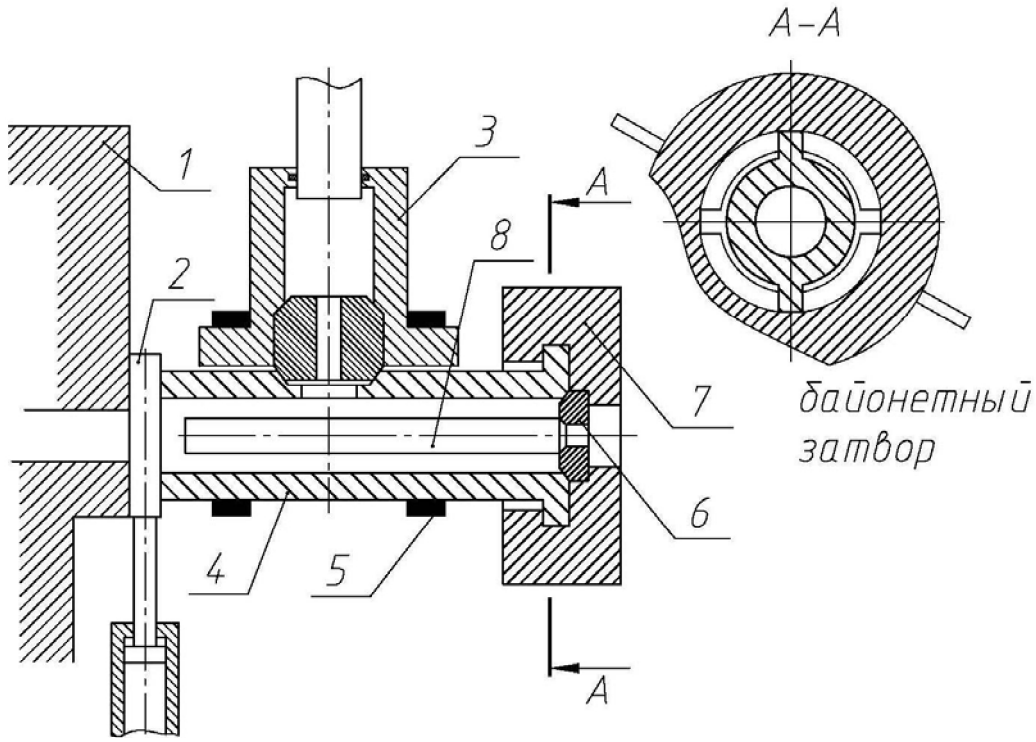


Рис. 63. Гидростат с двумя гидроцилиндрами с приводом от ползуна пресса: *1* – станина пресса; *2* – подвижный затвор, обеспечивающий возможность загрузки заготовки через отверстие в станине; *3* – гидроцилиндр для накопления давления рабочей жидкости; *4* – главный гидроцилиндр; *5* – обмотка из металлической проволоки; *6* – матрица; *7* – крышка байонетного затвора; *8* – заготовка

Матрица *6* прижимается к торцу главного гидроцилиндра *4* с помощью накидной крышки *7* и байонетного затвора. Последний представляет собой комбинацию двух выступов по бокам торца цилиндра *4* и двух прорезей с внутренней стороны крышки *7* (см. разрез *А-А*). При повороте за ручки крышки вокруг своей оси совмещают выступы на цилиндре с прорезями на крышке. Тогда крышку перемещением ее вправо по схеме можно снять. Так же крышку можно одеть назад на цилиндр и зафиксировать на нем, повернув за ручки вокруг оси. При этом выступы на гидроцилиндре войдут в окружной зазор в крышке и зафиксируют крышку, а также матрицу *6* на фланце цилиндра *4*.

4.1.2. Требования к деталям гидростатов и конструктивное исполнение этих деталей

В связи с тем, что детали повергаются давлениям в 2000…2500 МПа, они должны обладать очень высокой прочностью при сохранении пластических свойств.

Контейнеры (матрицы) гидростатов делают из сталей Х12Ф1; Х12М; 45ХНМ; 40ХНВА.

Вопросы прочности и пластичности матрицы решают сочетанием автофретирования и закалки.

В данном учебнике выше в качестве инструмента для процессов холодной объемной штамповки машиностроительных деталей применялись бандажированные матрицы. Процессы изготовления таких матриц включали в себя следующие этапы обработки: закалка, отпуск, бандажирование с натягом 0,2…0,4. При этом использовали бандаж с твердостью HRC 48…52.

В гидростатах используются методы достижения высокой прочности инструмента, отличные от традиционного для машиностроения бандажирования. Для инструмента гидростатов широко применяется автофретирование.

Автофретирование – операция, в которой деталь подвергают пластическому деформированию – раздаче – таким образом, чтобы все сечение детали было охвачено пластическими деформациями. Обработку проводят в холодном состоянии. В этом случае прочность деталей увеличивается в 4 раза при сохранении хороших показателей пластичности. Автофретирование применяют и к трубопроводам.

Операция автофретирования сложная, поэтому применяют также другие, конструкторские, решения.

В частности, решение, показанное на рис. 64. В конструкции, приведенной на этом рисунке, изображена разновидность банджирования. Однако вместо жесткого бандажа, характерного для традиционных машиностроительных штампов, применена обмотка матрицы большим количеством слоев ленты или проволоки.

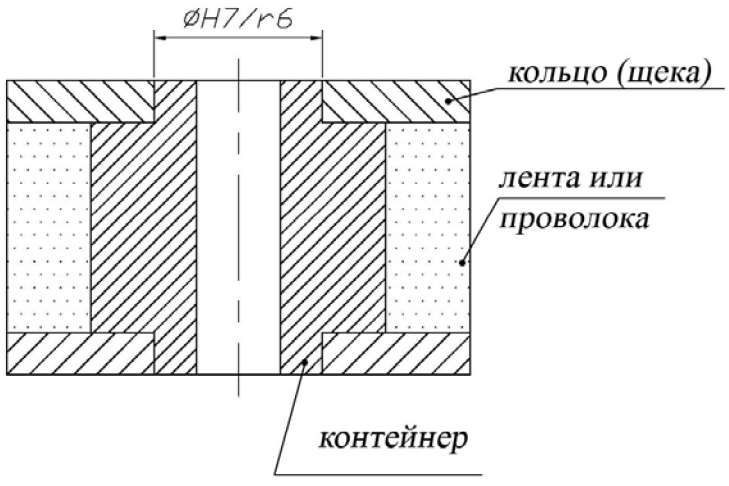


Рис. 64. Конструкция контейнера с бандажом в виде обмотки из ленты

Преимущество такой конструкции перед запрессовкой вставки в бандаж состоит в том, что исключается растрескивание бандажа под действием растягивающих напряжений во время хранения сборной матрицы. Конструкция с обмоткой из ленты не теряет своих свойств, даже если лента порвется в не-

скольких местах. При разрыве проволоки или ленты в каких-то отдельных местах другие слои удерживают концы разорвавшегося участка за счет трения, и работоспособность такой матрицы практически не уменьшается.

Существует еще вариант того, как можно осуществить бандажирование, не прибегая к напряженной конструкции в процессе хранения (рис. 65).

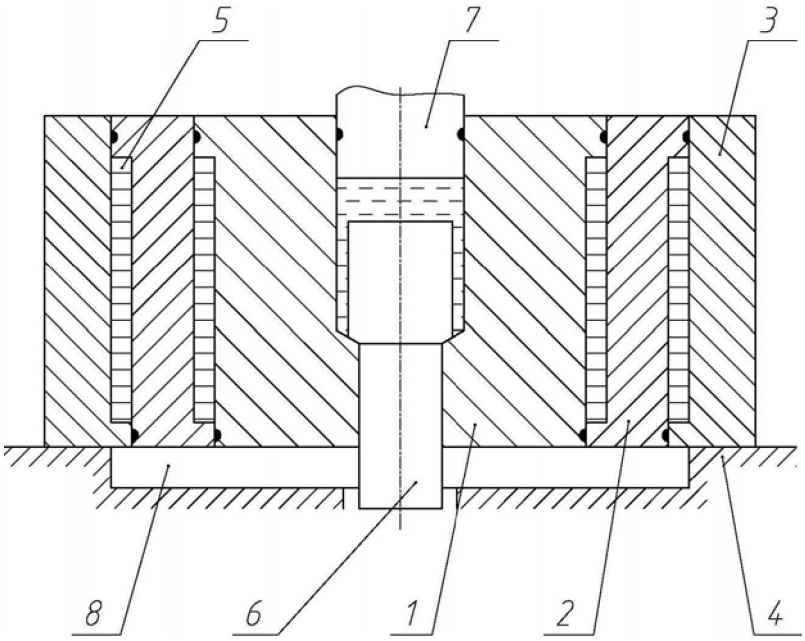


Рис. 65. Контейнер с гидроподдержкой

Плунжер *7* производит прессование заготовки *6* из контейнера *1*. При опускании плунжера *7* под действием сил контейнер пытается опуститься вниз в полость *8*, предусмотренную в опоре *4*. Однако верхний фланец контейнера *1* сжимает жидкость, заключенную между контейнером *1* и бандажом *2*. В результате возникает сила, стремящаяся опустить бандаж *2* в полость *8*, предусмотренную внутри опоры *4*. Эта сила является следствием давления жидкости, заключенной между контейнером *1* и бандажом *2*, на нижний фланец бандажа *2*. Бандаж *2* своим верхним фланцем сжимает жидкость, заключенную в полости между бандажом *2* и бандажом *3*. Бандаж *3* не может опуститься вниз, так как он уперт непосредственно на опору *4*.

Таким образом, вся составная конструкция приходит в некоторое уравновешенное состояние, при котором жидкость *5* в полостях между бандажами и контейнером находится под давлением и препятствует разрыву контейнера *1* под действием давления прессования.

Уплотнение плунжера

Плунжеры в гидростатах могут направляться по поверхности контейнера, как показано на рис. 64, или быть установлены с зазором внутри контейнера. В последнем случае не требуется шлифования внутренней поверхности контейнера на большую глубину (рис. 66).

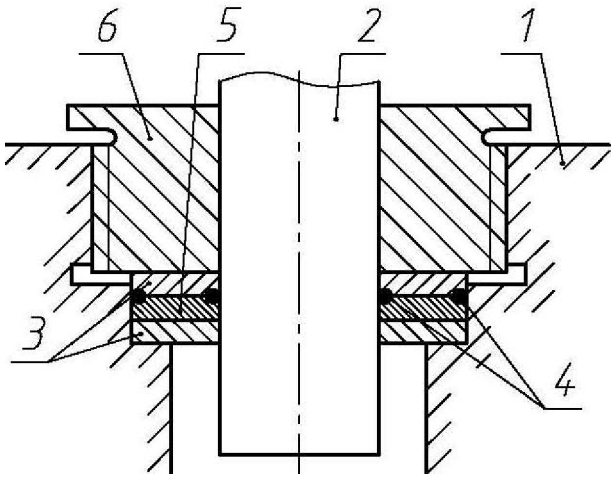


Рис. 66. Уплотнение плунжера, не имеющего посадки в контейнере

Плунжер *2* не имеет направления по поверхности контейнера *1*. Стальные кольца *3* имеют твердость 48…50 по Роквеллу, *4* – бронзовые кольца (из бериллиевой бронзы БрБ2), а фторопластовое кольцо *5* находится в состоянии, сжатом стальными кольцами *3*, и прижимает два кольца *4* из бериллиевой бронзы к поверхностям контейнера и плунжера. Первоначальное сжатие кольца *5* происходит при затяжке нажимной гайки *6*. Фторопластовое кольцо выполняет уплотняющую функцию до давления 500 МПа, а при более высоких давлениях эту функцию выполняют бронзовые кольца.

Посадка стальных колец по отношению к поверхности контейнера и плунжера должна иметь зазор не более 0,05 мм.

В других конструкциях плунжер направляется внутри контейнера (рис. 67).

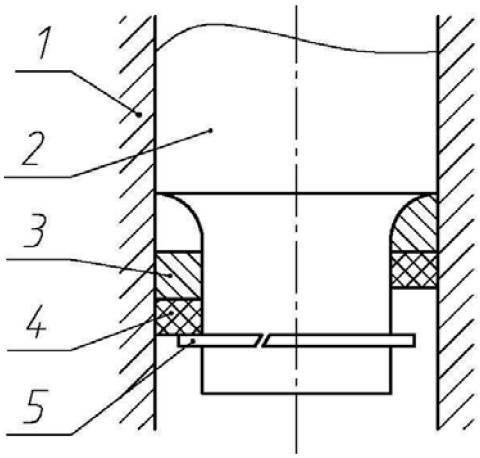


Рис. 67. Уплотнение плунжера, имеющего посадку в контейнере

При таких конструкциях на нижнюю часть плунжера *2* надевают медное кольцо *3*, резиновое кольцо *4* и опорную разрезную шайбу *5*. Разрезная шайба *5* предназначена для того, чтобы кольца не упали при введении плунжера *2* в контейнер *1*.

При возрастании давления *p* медное кольцо *3* подвергается пластической деформации, оно затекает в зазор между контейнером и плунжером, неизбежно образующийся, т.к. контейнер подвергается упругой деформации растяжения. Таким образом, медное кольцо *3* является одноразовым. Каждый раз при укладке новой заготовки в контейнер на нижнюю часть плунжера одевают новое свежеотожженное медное кольцо *3*.

При попытке сделать многоразовое уплотнение разработана следующая конструкция (рис. 68).

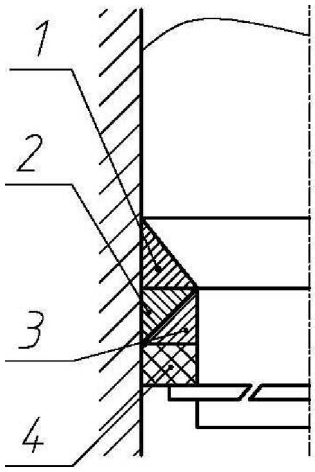


Рис. 68. Многоразовое уплотнение плунжера

В ней стальные кольца *1*, *2*, *3* сопряжены между собой по коническим поверхностям под углом 45°, *4* – резиновое кольцо.

Резиновые кольца герметизируют соединение при невысоких давлениях до того, как начинают работать металлические уплотнения.

Если матрица установлена внутри контейнера (рис. 69), то способы ее уплотнения аналогичны уплотнению плунжера, имеющего направление по контейнеру.

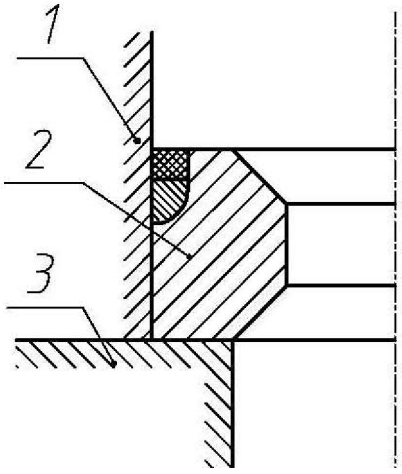


Рис. 69. Уплотнение при установке матрицы внутри контейнера:
1 – контейнер; *2* – матрица; *3* – опора

Уплотнение матрицы, расположенной вне контейнера, приведено на рис. 70.

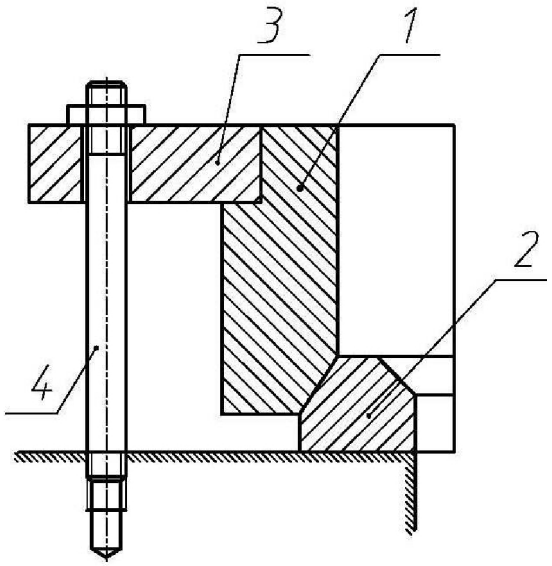


Рис. 70. Уплотнение, когда матрица установлена вне контейнера и сопрягается с контейнером по конической поверхности: *1* – контейнер; *2* – матрица; *3* – фланец; *4* – стяжная шпилька

Гидростатическая штамповка порошковых заготовок

Порошковые заготовки не могут контактировать с рабочей жидкостью гидростатов, поэтому их помещают в оболочки, называемые также мешками. От последнего слова произошли названия двух способов штамповки таких заготовок: способ мокрого мешка и способ сухого мешка.

Способ мокрого мешка показан на рис. 71.

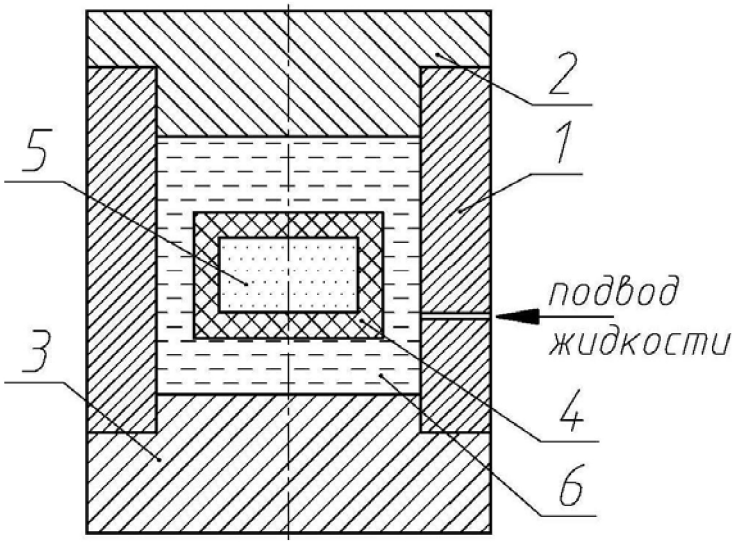


Рис. 71. Способ мокрого мешка: *1* – обойма гидростата; *2* – верхняя крышка; *3* – нижняя крышка; *4* – резиновая оболочка; *5* – порошок в засыпанном состоянии в начале и в виде уплотненной заготовки в конце; *6* – жидкость под высоким давлением (800…1000 МПа)

В этом способе оболочку с заготовкой непосредственно опускают в рабочую жидкость гидростата. После прессования снимают давление, открывают крышку *2* и с помощью подъемного устройства из гидростата вверх вынимают оболочку с заготовкой, с которых стекает жидкость.

Требование к способу: резиновая оболочка должна быть толстостенной для того, чтобы заготовка после уплотнения имела заданную форму, а не шаровидную или каплевидную.

Способ сухого мешка показан на рис. 72.

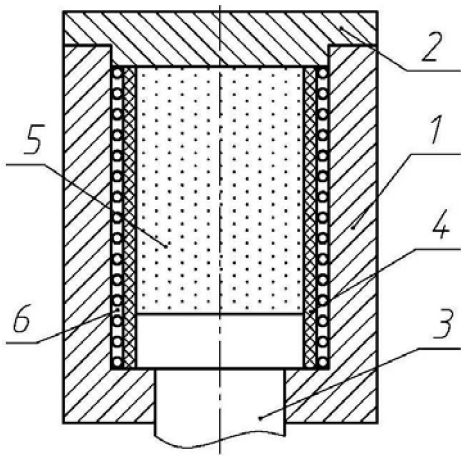


Рис. 72. Способ сухого мешка: *1* - обойма гидростата; *2* - верхняя крышка; *3* - выталкиватель порошковой заготовки; *4* - резиновая оболочка; *5* - порошковая заготовка; *6* - элементы упругой подвески резиновой оболочки внутри корпуса гидростата

В конце уплотнения заготовки после снятия давления рабочей жидкости, находящейся в полости между внутренней стенкой детали *1* и внешней поверхностью резиновой оболочки *4*, поднимают крышку *2* и выталкивают деталь *5* выталкивателем *3*. Поскольку деталь сухая, отсюда следует название «способ сухого мешка».

При использовании способа мокрого мешка резиновая оболочка одноразовая, а в способе сухого мешка оболочка используется неоднократно.

Квазистатическое формование

В данном способе (рис. 73), в отличие от формования порошковой заготовки в гидростате, на заготовку не воздействует жидкость высокого давления [18].

Однако нагружение заготовки близко к тому, которое происходит в гидростате, поэтому способ называется квазистатическим формованием. Это достигается благодаря тому, что при рабочем ходе пуансона *3* объем пространства в контейнере *1* между выталкивателем *2* и пуансоном *3* уменьшается. Заготовка *4* со всех сторон равномерно сжимается давлением со стороны резиновой оболочки *5*. Нагружение заготовки близко к тому, которое имело

бы место при равномерном ее обжатии рабочей жидкостью гидростата. Различие между рассматриваемым способом и способами мокрого и сухого мешка в том, что при квазистатическом формовании оснастку устанавливают на рабочий стол гидравлического пресса, и на пуансон *3* (рис. 73) воздействует ползун этого пресса. В рассмотренных выше способах мокрого и сухого мешка заготовку помещают в гидростат. Приставка «квази-» в названии рассматриваемого способа означает, что всестороннее сжатие заготовки в данном способе формования является не столь статическим, как в гидростате.

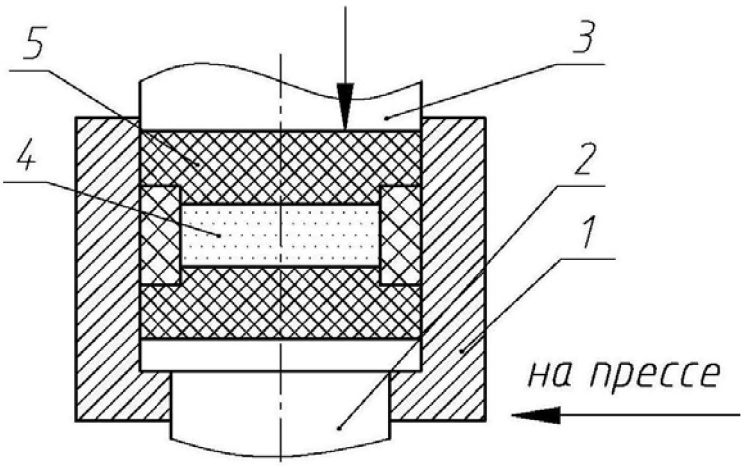


Рис. 73. Квазистатическое формование: *1* – оболочка; *2* – выталкиватель; *3* – пуансон с приводом от ползуна пресса; *4* – порошковая заготовка; *5* – элементы, из которых собирается резиновая оболочка

Использование жидкости высокого давления при штамповке на прессе при выдавливании тонкостенных стаканов из толстостенных

Развитием способов обработки давлением рабочей жидкости является изготовление не только заготовок простейшей формы, из которых в дальнейшем резанием будут произведены машиностроительные детали, а изготовление заготовок сложной формы, приближенной к форме готовых деталей. К способам изготовления заготовок сложной формы относится штамповка выдавливанием тонкостенных стаканов в условиях жидкостного трения и гидроподпора [1].

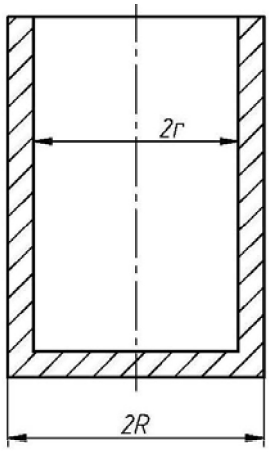


Рис. 74. Обозначения размеров стакана

Эскиз стакана с обозначением размеров приведен на рис. 74.

Толщина стенки стакана связана с отношением R/r, это отношение откладывается на оси абсцисс графика, приведенного на рис. 75.

На оси ординат этого графика приведены значения удельной силы выдавливания (см. парагр. 3.1 данного учебника).

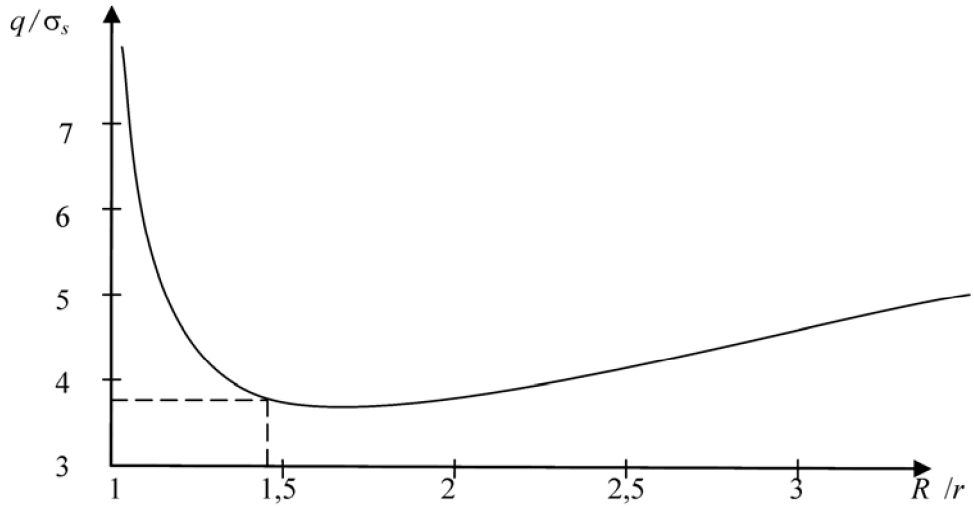


Рис. 75. Зависимость изменения удельной силы $q=P/(\pi r^2)$ от отношения R/r (см. рис. 74)

На рис. 75 видно, что наименьшее значение удельной силы выдавливания соответствует отношению R/r, равному примерно 1,5.

В рассматриваемом процессе штамповку стакана производят в два этапа. В начале в сплошной цилиндрической заготовке выдавливают полость такого размера, чтобы отношение внешнего радиуса стакана R к радиусу полости r равнялось примерно 1,5. При этом, как видно из графика на рис. 75, удельная сила q наименьшая. Далее меняют пуансон первого перехода на пуансон второго перехода, имеющий больший диаметр, а в полость заготовки, изготовленной на первом переходе, заливают рабочую жидкость. Затем осуществляют второй переход штамповки в соответствии с рис. 76.

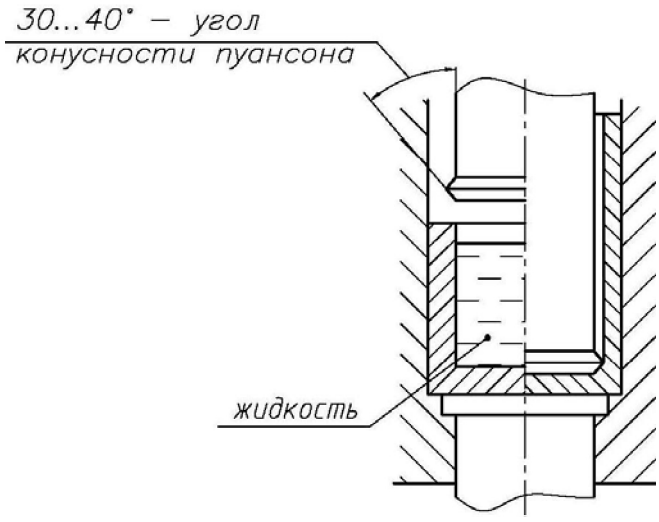


Рис. 76. Выдавливание заготовки с полостью, заполненной жидкостью

В полость заготовки заливают жидкость: минеральное масло (можно отработанное), глицерин, воду и т.д. При вдавливании конической части пуансона в заготовку происходит плотное запирание и сжатие жидкости. При достижении определенного давления жидкость начинает деформировать металл,

прилегающий к конической части пуансона. Дальнейшее вдавливание пуансона и рост давления в жидкости приводят к полному отделению заготовки от пуансона и к прорыву жидкости. С этого момента вдавливание пуансона происходит в режиме жидкостного трения. Касательные напряжения по всей поверхности очага пластической деформации имеют направление, совпадающее с направлением течения металла, и, следовательно, способствуют развитию пластической деформации заготовки.

Если бы в полости заготовки не было жидкости, то пуансон, входя в более узкую полость, перемещал бы внутреннюю поверхность стенки вниз и в конце получилась бы деталь, имеющая приблизительно такую же высоту стенки, как и у начальной заготовки, но более толстое дно, причем в рассматриваемом способе слои металла около дна имели бы складки.

Активные силы трения уменьшают удельную силу, которую необходимо выдерживать пуансону, чтобы деформировать заготовку, а гидроподпор в полости заготовки исключает течение материала заготовки в сторону ее дна [1].

Прямое выдавливание труднодеформируемых материалов

Для успешного деформирования таких материалов требуется создание высокого гидростатического давления в заготовке [36]. Это может быть осуществлено одним из следующих способов (рис. 77).

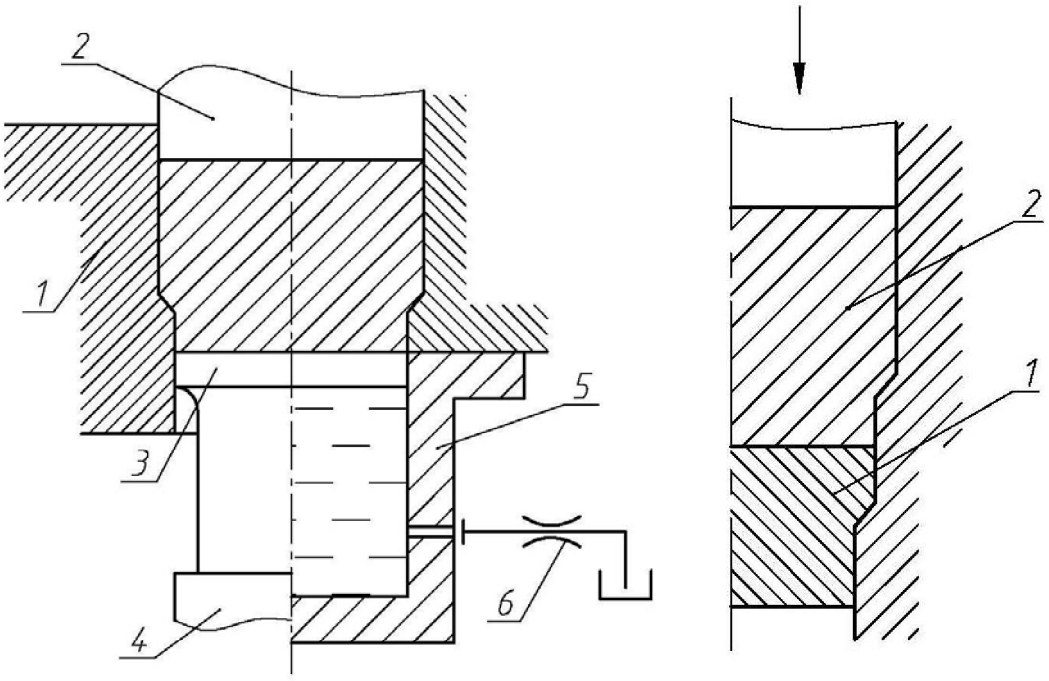


Рис. 77. Способы создания высокого гидростатического давления в заготовке: а) противодавление от гидроцилиндра пресса; б) противодавление от автономного гидроцилиндра; в) противодавление, создаваемое вспомогательной дополнительно выдавливаемой заготовкой

а) Заготовка размещается в полости матрицы *1* и выдавливается из нее пуансоном *2*. Чтобы предотвратить трещинообразование при штамповке хрупких сплавов, на выходящую из полости матрицы часть заготовки создают противодавление с помощью плунжера *3*. Плунжер *3* может быть оперт на выталкиватель пресса *4*, однако в этом случае потребуется некоторая доработка гидросхемы и электросхемы пресса, так как последовательность срабатывания плунжера и выталкивателя установлена по технике безопасности и заблокирована.

б) В другом случае используется конструкция, при которой плунжер *3* размещают внутри отдельного гидроцилиндра *5*. Плунжер *3* опирается непосредственно на рабочую жидкость, которая стравливается через подпорный клапан *6* или поставленный в обратную сторону дроссель.

в) Используется двухступенчатая матрица, из нижней части которой выдавливается вспомогательная заготовка (создающая противодавление).

Верхняя заготовка *2* выполнена из труднодеформируемого материала, заготовка *1* – из пластичного материала. В процессе выдавливания заготовки *1* создается подпор на заготовку *2*. Все эти три способа позволяют предотвратить разрушение выдавливаемой основной заготовки.

4.2. Газостатическая обработка заготовок

Газостаты сопоставляют с горячей объемной штамповкой на прессе (разновидность горячей объемной штамповки). Преимущество газостатов перед горячей объемной штамповкой – исключение образования окалины, так как заготовка находится в защитной атмосфере (газ Ar).

Газостаты изготавливаются по индивидуальному проекту [23, 40]. Один из вариантов конструкции газостата приведен на рис. 78, 79.

Максимальная температура нагрева заготовки в газостате около 2250 °С, максимальное давление – 35 МПа. Чаще всего максимальное давление в газостате менее 20 МПа, его повышают с помощью мультипликатора. Рабочее давление в газостате значительно превышает начальное давление, поскольку газ нагревается до очень высоких температур и расширяется. При этом давление в рабочей камере значительно возрастает. Для каждого газостата составляется индивидуальный график $P = f(t)$ давления в рабочей камере от температуры нагрева газовой среды. Таких графиков может быть несколько, т.к. это зависит от объема газовой камеры (т.е. от объема газа), а объем меняется в зависимости от объема загруженной заготовки.

Обслуживающий персонал находится в другом помещении от газостата с целью обеспечения безопасности.

В связи с тем, что заготовки сначала нагреваются в газостате, потом выдерживаются заданное время обработки и далее охлаждаются вместе с газостатом, время газостатической обработки составляет 15…20 часов.

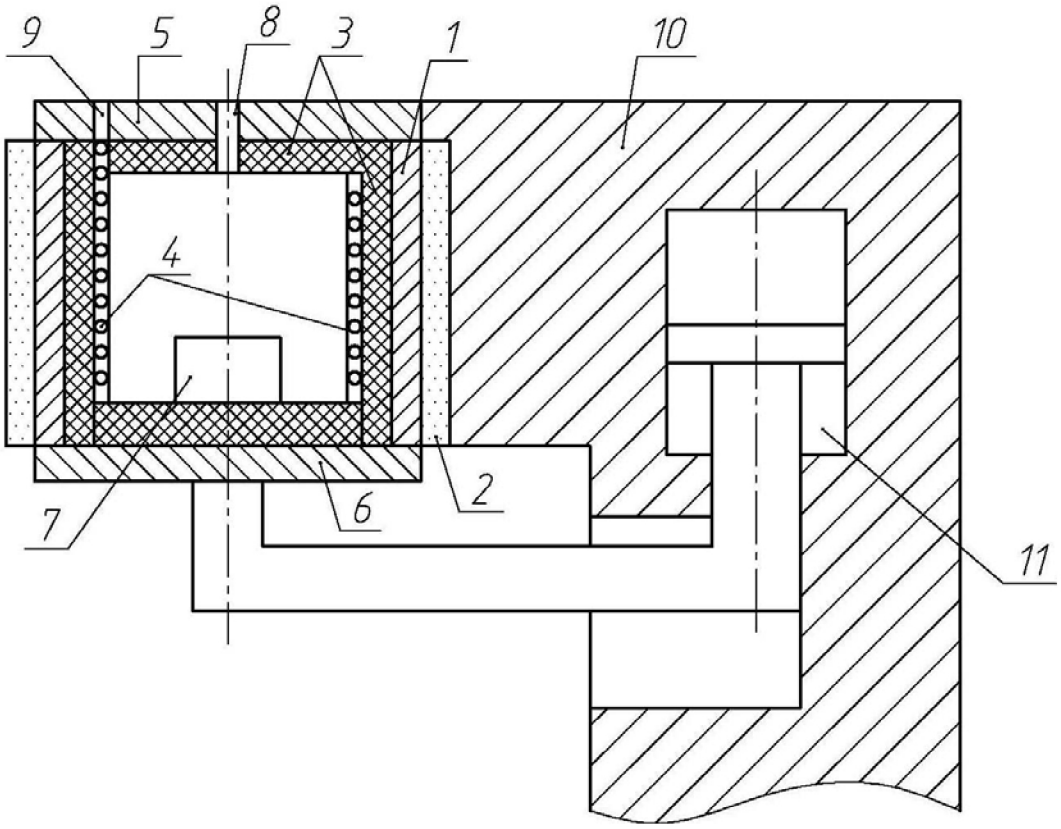


Рис. 78. Рабочая зона газостата с нижней загрузкой: *1* – корпус газостата; *2* – упрочняющая обмотка (лента металлическая (бандаж)); *3* – теплоизоляция; *4* – нагревательные элементы; *5* – верхняя крышка; *6* – нижняя крышка; *7* – обрабатываемая заготовка; *8* – отверстие для подвода газа; *9* – отверстие для подвода электрических проводов; *10* – станина; *11* – гидроцилиндр для опускания и поднятия нижней крышки *6*



Рис. 79. Подвижная рама станины газостата

В данном случае нерешенной остается проблема прижатия крышек к корпусу *1*.

В небольших газостатах крышки удерживаются резьбой, т.е. завинчиваются или удерживаются байонетными затворами.

В крупных газостатах используют станину, имеющую подвижную раму, которая наезжает на газостат и не позволяет крышкам размыкаться (рис. 78). Такая конструкция вызвана тем, что сам газостат целесообразно иметь в неподвижном состоянии, поскольку к нему подведены газовые трубы и электрические провода (шины).

Есть разные конструкции газостатов: имеются такие, где загрузка и выгрузка осуществляются через верхнюю крышку. Однако это для заготовок небольшой массы, которые можно опускать в газостат в металлической корзине.

Газостатическая обработка применяется как для деформирования исходных заготовок с целью придания им нужной формы, так и для обработки готовых машиностроительных деталей с целью придания им особых механических свойств.

Отметим также, что газостатическая обработка – один из видов термической обработки, совершаемой с использованием высокого давления и защитной атмосферы. Фактически это печь с уникальными свойствами (одновременно термическая обработка и давление).

Газостатическая обработка порошковых заготовок

С целью получения сплавов с уникальными свойствами, которые невозможно получить у литых сталей, составляют порошковые композиции и изготавливают из них заготовки простой формы или сразу машиностроительные детали с применением газостатов. Заготовки простой формы изготавливают на металлургических предприятиях, например, Днепроспецсталь. Машиностроительные детали изготавливают, например, на ВИЛСе.

Отличительной особенностью при газостатической штамповке деталей является необходимость помещения порошка в оболочку перед загрузкой в газостат. Оболочки делают из малоуглеродистой стали (известны случаи оболочек из стекла, керамики и нержавеющей стали).

Оболочка своей внутренней формой должна полностью соответствовать форме изготавливаемой машиностроительной детали, а внешняя форма оболочки наиболее простая. В этом случае будут разнотолщинность оболочки и разные деформации, что учитывают при проектировании заготовки.

Газостатической обработке чаще всего подвергают порошки, полученные распылением, такие как ПЖРВ – порошок железный, распыленный водой; ПЖР – порошок железный, распыленный воздухом.

Эти порошки имеют сферическую форму частиц. Сферические порошки обладают лучшей теплопроводностью по сравнению с восстановленными из окалины и вихревыми порошками. Однако поверхность частиц покрыта ок-

сидной пленкой, которая препятствует высокой теплопроводности, поэтому исходные порошки вначале подвергают восстановлению в среде водорода. Восстановление наиболее эффективно при температуре, приблизительно равной 1000 °С, если порошок железный. После восстановления порошки подвергают вакуумной обработке (дегазации), чтобы удалить остатки продуктов восстановления с поверхности частиц. Для этого создают вакуум и выдерживают в нем порошок в течение 3…5 часов. Только после этого порошок засыпают в капсулу, там его подвергают утряске.

После утряски в течение 10…15 секунд плотность достигает 60…70 % от теоретической плотности материала, дальнейшая утряска повысит плотность максимум на 1…2 %. Если в процессе подготовки и загрузки порошка какую-то операцию делали на воздухе, то капсулу надо вакуумировать. После этого капсулу с порошком запаивают, далее она нагревается в газостате или печи. Если капсула нагревается в печи, то отдельно нагревается сам газостат. Этим достигается экономия времени и энергии.

Наиболее часто загрузка в газостат производится с открытием нижней крышки. Связано это с тем, что аргон легче кислорода, и при открытии нижней крышки горячий газ остается в рабочей камере газостата. При загрузке через нижнюю крышку не требуется применения металлической корзины, которая в горячем состоянии может расплавиться и потерять форму.

Охлаждение садки всегда производится вместе с газостатом, так как не разработана технология выпуска в атмосферу горячего газа.

При загрузке в горячем состоянии применяют особые требования, чтобы детали газостата не окислялись на воздухе, поэтому газостаты с горячей загрузкой всегда более дорогие, чем газостаты с холодной загрузкой.

После газостатической обработки оболочку с детали удаляют чаще всего травлением (растворяют ее в кислоте или щелочи). Если стекло, то раскалывают. В последние годы пробуют технологии безоболочковой обработки порошковых заготовок. При такой технологии заготовку вначале формуют на прессе или в гидростате, где она приобретает необходимую форму.

4.3. Штамповка деталей из трубных заготовок

Трубные заготовки используются сравнительно редко, так как труба в 2 раза дороже прутка; по ГОСТу труба имеет большой допуск на разностенность, который составляет 10…12 % от толщины стенки; трубу невозможно резать в штампах, так как она деформируется.

Поэтому для производства полых поковок или заготовок трубной формы чаще используют техпроцесс, схематично показанный на рис. 80.

При штамповке таких деталей непосредственно из трубных заготовок заготовку отрезают или на токарных станках, или пилами, чтобы не допустить ее деформации. Такие способы отрезки удорожают изделие.

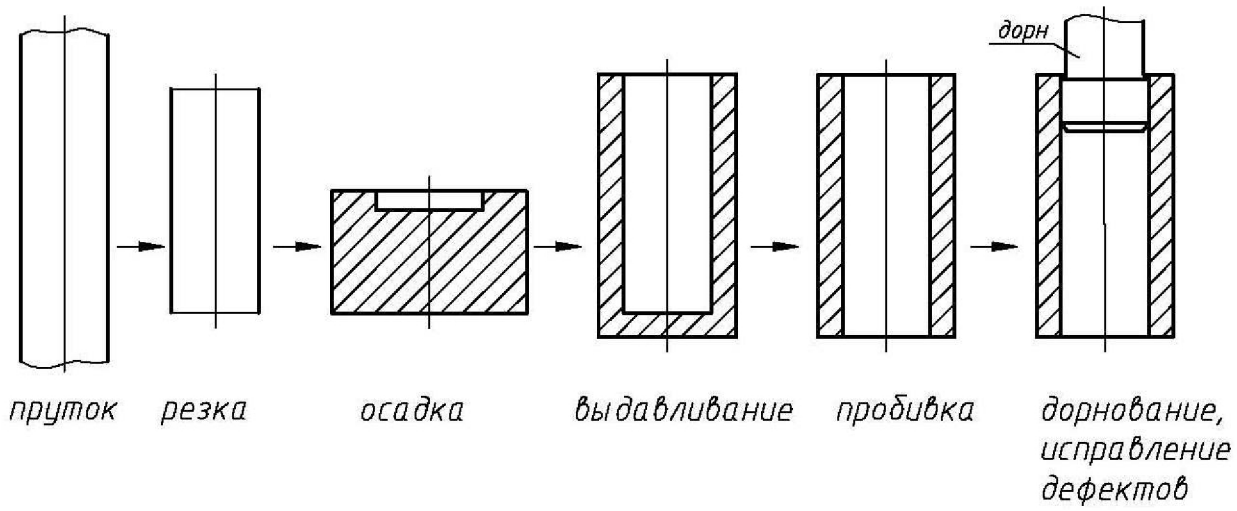


Рис. 80. Технологический процесс штамповки трубной поковки

При работе с трубной заготовкой появляется одна из возможностей использования активных сил контактного трения (рис. 81) [2].

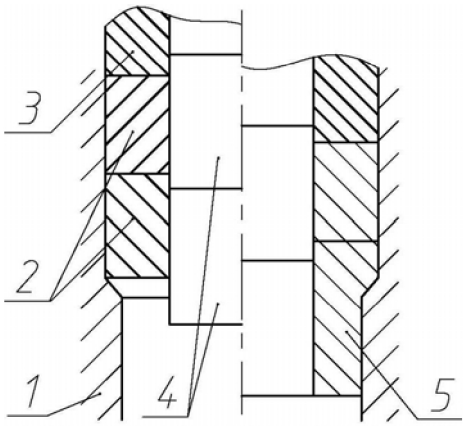


Рис. 81. Штамповка трубных заготовок с активными силами контактного трения по внутренней поверхности: *1* – матрица для прямого выдавливания; *2* – заготовки; *3* – трубный пуансон; *4* – закаленные оправки; *5* – выдавливаемая деталь

Так как очаг пластической деформации находится в верхней части, а вытекающий металл из-за разницы поперечных площадей имеет более высокую скорость, то металл в трубной части *5* увлекает за собой оправку, и создаются активные силы трения напротив очага пластической деформации.

Изготовление фланца на трубных заготовках. Штамповка в разъемной матрице

Штамповкой из трубной заготовки можно изготовить деталь с фланцем (рис. 82), при этом применяют разъемную матрицу. При прохождении пуансона *4* через полость заготовки *5* металл вытесняется в полость матрицы, формирующую фланец.

При правильном выборе степени обжатия металл из верхней части трубной заготовки заполняет кольцевую полость *6* и на заготовке образуется фланец.

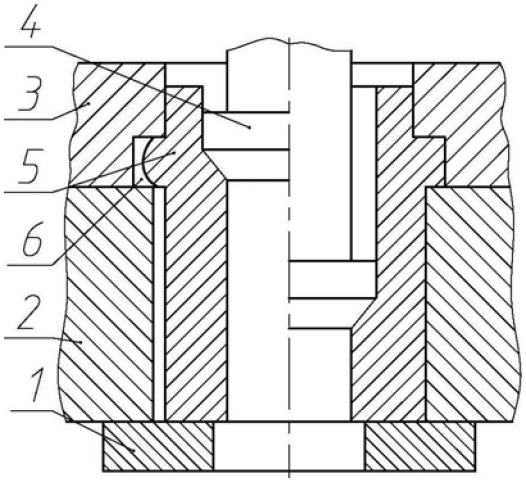


Рис. 82. Штамповка детали с фланцем из трубной заготовки: *1* – опорное кольцо; *2* – нижняя полуформа; *3* – верхняя полуформа; *4* – пуансон; *5* – заготовка; *6* – кольцевой паз

Отверстие в опорном кольце *1* подбирают так, чтобы в конце рабочего хода коническая часть пуансона могла опуститься в это отверстие, а цилиндрическая часть пуансона могла завершить калибровку нижней части заготовки.

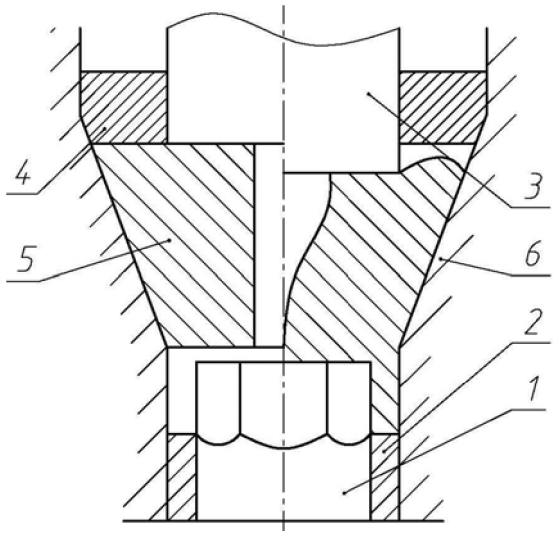


Рис. 83. Выдавливание полости сложной формы в заготовке из легированной стали с целью изготовления штампового инструмента (матрицы): *1* – мастер-пуансон; *2* – центрирующая втулка; *3* – толкатель; *4* – центрирующее кольцо; *5* – заготовка; *6* – матрица с конической полостью

Штамповка из трубных заготовок имеет *преимущество* по сравнению со штамповкой из прутка, которое заключается в том, что удельная сила, действующая на инструмент при штамповке из трубных заготовок, значительно меньше, поэтому если нужно изготовить матрицу сложной формы, то тоже часто используют трубную заготовку.

При выдавливании матриц используют или холодную штамповку, или неполную холодную штамповку, при которой снимаются только остаточные напряжения в деформируемом металле, но отсутствуют процессы рекристаллизации.

На рис. 83 показано выдавливание, совмещенное с обжимом трубной заготовки. Эта операция называется выдавливанием, потому что в момент соприкосновения диаметр полости заготовки меньше диаметра окружности, описанной вокруг шестерни пуансона. Применяется она при изготовлении матриц [49].

4.4. Штамповка обкатыванием

Все операции, выполненные с использованием прокатных технологий, существенно производительнее, чем штамповка на прессах. Напомним, однако, что для их промышленного применения требуется создание специализированного оборудования.

Штамповка обкатыванием применяется для производства осесимметричных деталей (рис.84).

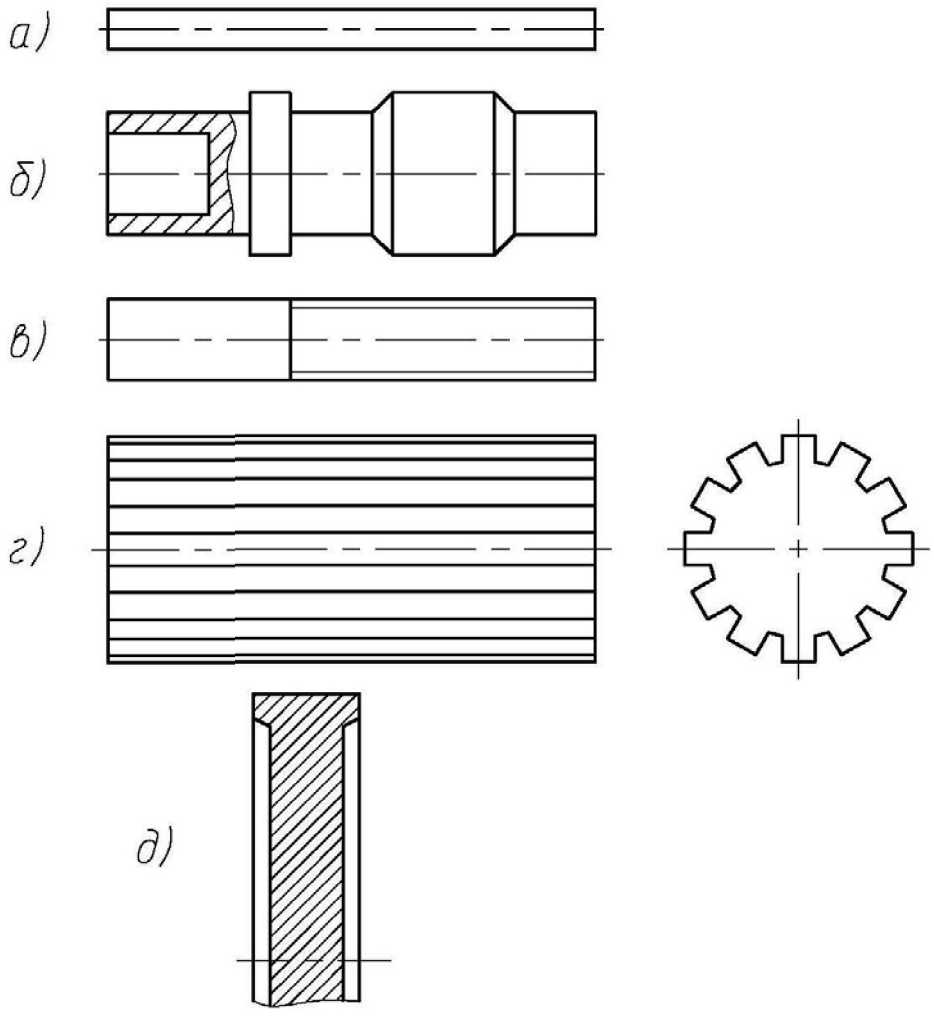


Рис. 84. Детали, изготавливаемые штамповкой с обкатыванием:
а) калиброванные оси; б) ступенчатые валы, в том числе полые; в) валы с резьбой;
г) валы со шлицами; д) плоские детали с бортом

Схема обкатывания рейками приведена на рис. 85.

Детали, изображенные на рис. 84, видны по стрелке А (рис. 85). Рейки сближаются между собой (стрелка В).

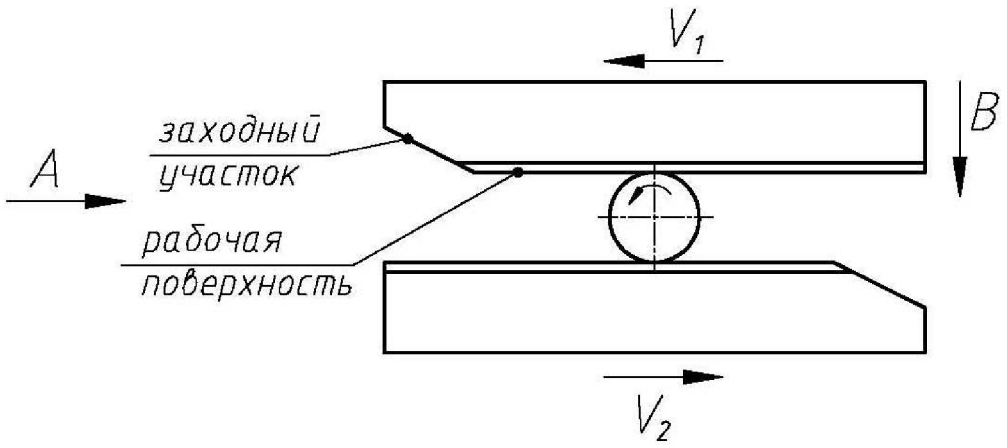


Рис. 85. Обкатывание рейками

Если скорости перемещения реек равны (V_1=V_2), то деталь при обработке остается на месте.

Операция обкатывания позволяет изготавливать детали с полостями (рис. 86).

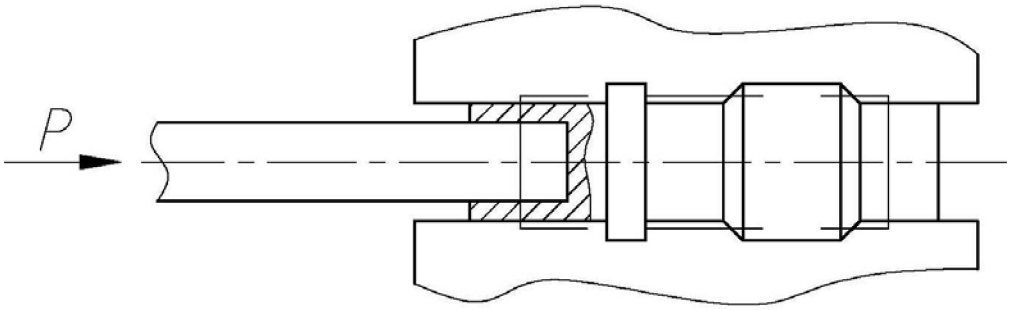


Рис. 86. Формирование полости при обкатывании: пунктиром показана исходная заготовка

Благодаря тому, что рейки имеют заходные участки, они способны захватить заготовку, имеющую диаметр больший, чем основной диаметр изготавливаемой детали.

В процессе пластической деформации материал заготовки перераспределяется таким образом, что заготовка заполняет полости фланцев и удлиняется. Если при этом по центру заготовки в осевом направлении действует дополнительный пуансон силой P, то в заготовке выдавливается осевая полость. При этом удельная сила, действующая на пуансон, существенно ниже, чем при обычном выдавливании полости в заготовке, находящейся в матрице. Это связано с тем, что в этом случае гидростатическое давление (среднее сжи-

мающее напряжение) существенно меньше, чем при выдавливании заготовки, помещенной в матрицу [43].

Для штамповки с обкатыванием создают специальные машины. Так как сила меньше, чем при обычной штамповке, то машины менее металлоемкие, чем прессы.

Рейки для обкатывания имеют рельефную поверхность (рис. 87).

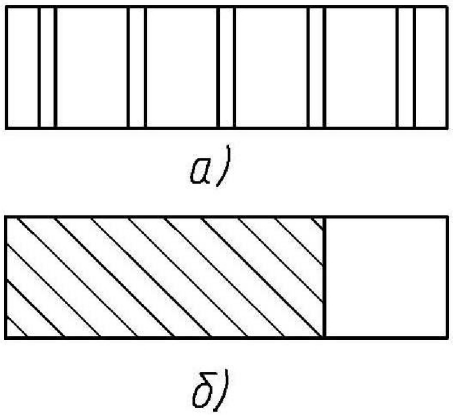


Рис. 87. Примеры рельефа реек: а – для накатывания детали со шлицами;
б – для накатывания резьбы

При накатывании резьбы заготовка (вал) перемещается в осевом направлении без специального привода, а просто под действием реек.

Для повышения производительности обкатывания рейками применяют устройство, приведенное на рис. 88.

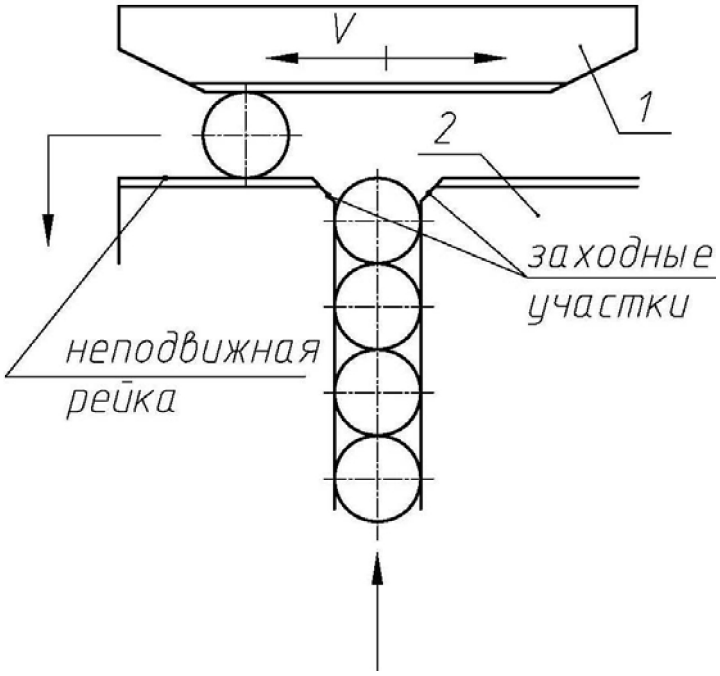


Рис. 88. Устройство для накатывания рейками, исключающее холостой ход:
1 - подвижная рейка; *2* - неподвижные рейки

Обкатывание вращающимся инструментом

На рис. 89 приведена схема обкатывания двумя, а на рис. 90 – тремя вращающимися валками.

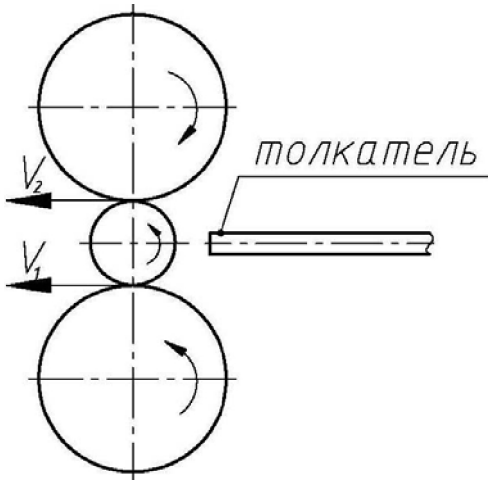


Рис. 89. Схема обкатывания двумя вращающимися валками

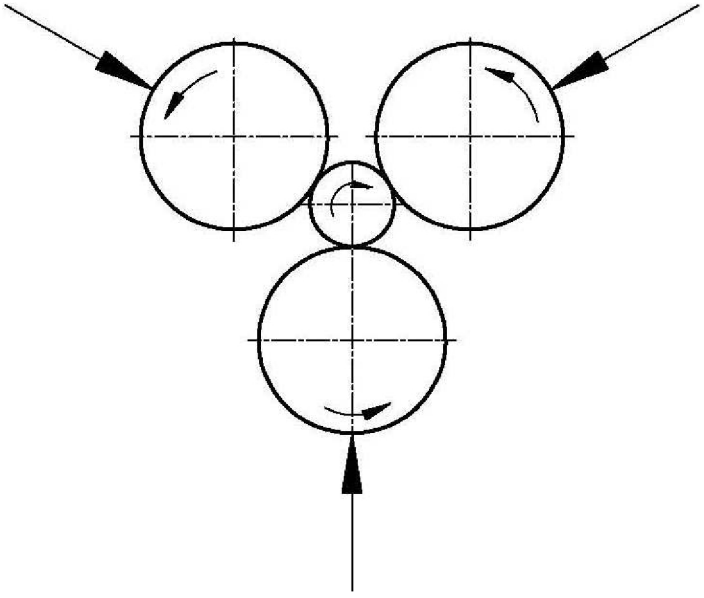


Рис. 90. Схема обкатывания тремя вращающимися валками

Для того чтобы заготовка втягивалась в рабочее пространство между валками, проходила через это рабочее пространство и выпадала с противоположной стороны, скорости валков должны быть разные ($V_2 > V_1$). Это достигается или вращением валков с разными угловыми скоростями, или использованием валков разных диаметров при одинаковых скоростях их вращения.

Если сила трения недостаточна для затягивания заготовки, ставят толкатель.

Преимущество изображенной на рис. 90 схемы заключается в том, что можно деформировать более хрупкие материалы, так как при обработке увеличивается гидростатическое давление.

Обкатывание в барабанах

Названная операция становится понятна при рассмотрении рис. 91.

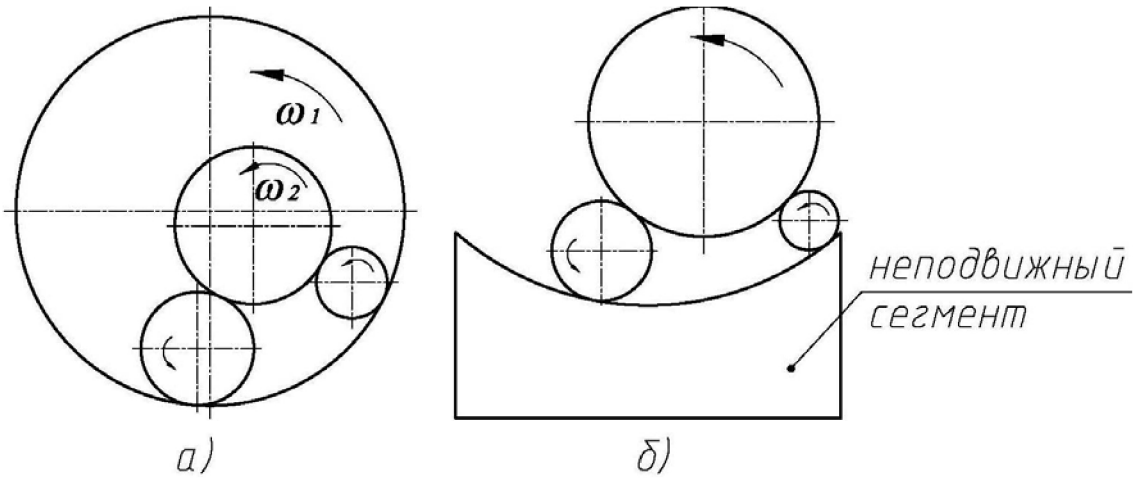


Рис. 91. Обкатывание в барабанах: *а* – оба барабана вращаются;
б – вместо внешнего барабана использован неподвижный сегмент

Заготовка (рис. 91, а) обрабатывается в сужающемся по мере ее прохождения зазоре между барабаном, вращающимся со скоростью ω_1, и валком, вращающимся внутри барабана со скоростью ω_2.

Можно использовать только часть барабана (рис. 91, *б*) в виде неподвижного сегмента.

Именно на схеме с неподвижным сегментом основана операция *гуртовка*. Гуртовка применяется в монетном производстве. Тип изготавливаемых деталей приведен на рис. 84, *д*.

Валковая штамповка

Так называется выполнение штамповки с обкатыванием на обычных прессах (например, гидравлических) (рис. 92).

Валковая штамповка – формоизменяющая операция обработки металлов давлением, получения осесимметричных деталей из цилиндрической заготовки путем одновременного приложения к ней осевых и радиальных сил [47]. Осевое нагружение заготовки при валковой штамповке создается перемещением пуансона, а радиальное – обкаткой ее боковой поверхности в роликах или валках. При валковой штамповке технологическая сила имеет на порядок меньшую величину, чем при традиционных методах объемной штамповки выдавливанием. Оснастка для валковой штамповки имеет относительно небольшую стоимость, время технологической подготовки производства при валковой штамповке незначительное по сравнению с другими технологиями, штампы могут быть быстро переналажены на другой типоразмер детали.

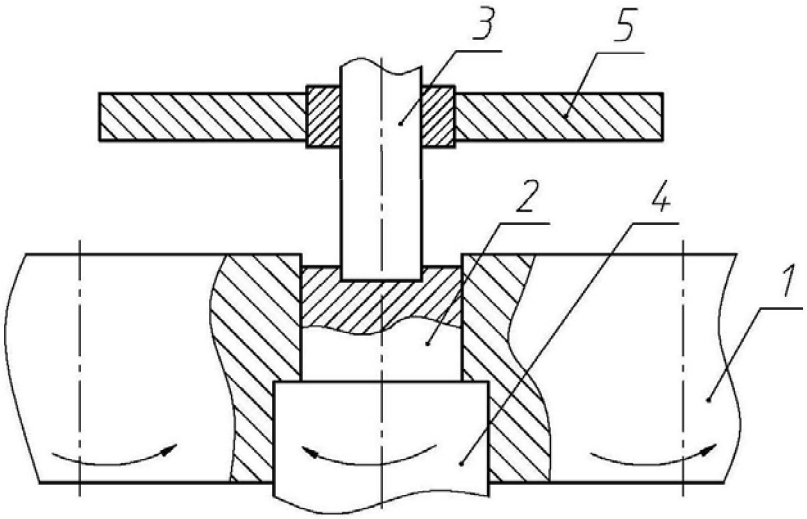


Рис. 92. Валковая штамповка: *1* - валки; *2* - обрабатываемая заготовка; *3* - пуансон; *4* - контрпуансон, задающий вращение; *5* - съемник

Поскольку требуется оборудование небольшой мощности, валковую штамповку можно применять как в крупносерийном, так и в средне- и мелкосерийном производствах.

Общим признаком деталей, возможность изготовления которых обеспечивает валковая штамповка, является симметрия поперечных размеров относительно оси заготовки. К ним относятся детали без осевого отверстия с одним или несколькими наружными утолщениями, расположенными на различных участках заготовки (пробки, заглушки и т.д.). Также детали с полостью как глухой, так и сквозной. Геометрия наружной поверхности полых деталей совпадает с геометрией наружных поверхностей деталей без полости. Это ступенчатые детали с одним или несколькими наружными утолщениями (фланцы, втулки и т.д.) и детали без наружных утолщений (гильзы, стаканы).

Валковая штамповка может осуществляться по одной из двух кинематических схем, отличающихся между собой способом обеспечения вращения. В первом случае вращение заготовки осуществляется посредством передачи ей крутящего момента приводными валками, во втором – крутящий момент заготовке передается от контрпуансона, а валки являются неприводными.

Схема с приводом от валков имеет недостаток, заключающийся в том, что момент при большом радиальном обжатии может оказаться недостаточным для преодоления сопротивления заготовки деформированию, что приведет к заклиниванию привода. Валковая штамповка, осуществляемая по этой схеме, сложнее, чем при передаче вращения от контрпуансона. Последняя предпочтительнее с точки зрения повышения качества изготавливаемых деталей, снижения энергосиловых затрат, увеличения производительности.

Валковая штамповка может осуществляться по двух-, трех- и многовалковой схемам. При штамповке в двухвалковой матрице по схеме с передачей крутящего момента от приводных валков для удержания заготовки на позиции

обработки необходимо применение специальных захватно-ориентирующих устройств, аналогичных показанному на рис. 89. При этом необходимо обеспечить включение привода валков только после возникновения на поверхности пуансона и заготовки сил, достаточных для удержания заготовки на позиции обработки. При валковой штамповке в двухвалковой матрице по схеме с приводом вращения от контрпуансона применения захватно-ориентирующих устройств не требуется.

С точки зрения повышения устойчивости заготовки, улучшения ее позиционирования относительно оси вращения и удержания в валковой матрице наилучшей является трехвалковая схема штамповки. При этом максимальный радиус валков ограничен размером исходной заготовки и определяется формулой:

$$R_{к}^{\max} < 6,4641\ R,$$

где R – радиус заготовки, мм; $R_{к}^{\max}$ – максимальный радиус валка при данном радиусе заготовки, мм.

С увеличением количества валков больше трех их максимальный радиус уменьшается, при этом уменьшается возможность углубления в заготовку в радиальном направлении и нагрузка, воспринимаемая каждым из валков. Устойчивость заготовки повышается, однако усложняются процессы ее позиционирования и извлечения с позиции обработки.

При трех валках создается более высокое всестороннее сжатие заготовки, чем при двух валках. Это предотвращает разрушение заготовки при штамповке малопластичных материалов.

Наиболее существенное влияние на процесс валковой штамповки оказывают следующие технологические параметры и режимы обработки: отношения радиусов пуансона и заготовки ($R_{п}/R$), заготовки и валков ($R/R_{к}$), форма торцевой поверхности пуансона, относительная скорость деформирования заготовки и количество валков. Относительная скорость деформирования при валковой штамповке подразумевает отношение скорости перемещения пуансона к частоте вращения заготовки и определяет величину радиального обжатия заготовки и производительность процесса.

При этой операции выполняют глубокие полости в штампуемых заготовках. Внешняя поверхность изготавливаемых изделий может иметь фланцы в любом месте по высоте, а внутренняя поверхность может быть ступенчатой, но всегда расширяющейся в сторону от дна к деформирующему пуансону [47].

Поперечно-клиновая прокатка

Способ (рис. 93) предназначен для того, чтобы удлинить часть заготовки меньшего диаметра, расположенную между двумя фланцами, посредством перераспределения материала фланцев в эту удлиняемую часть заготовки [22, 33].

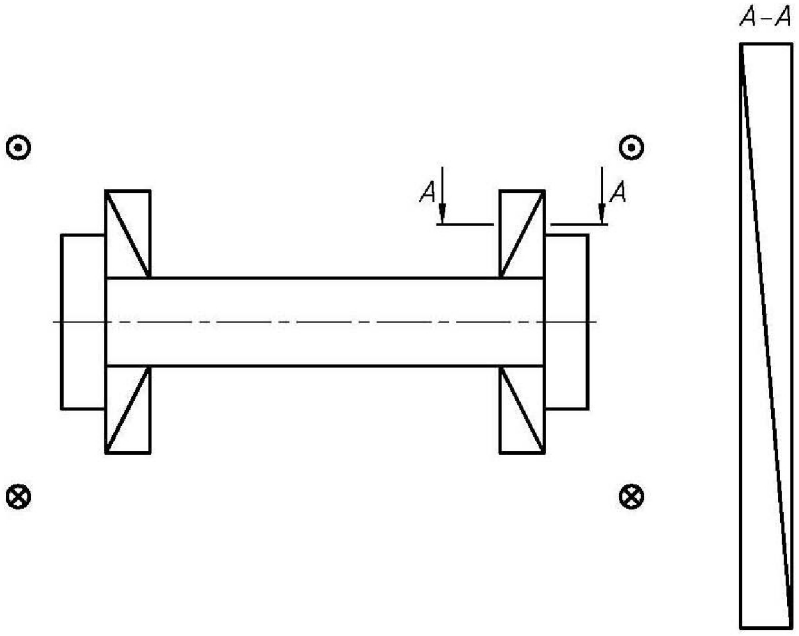


Рис. 93. Поперечно-клиновая прокатка

Поперечно-клиновой прокаткой получают заготовки валов и осей с резкими ступенчатыми переходами диаметром от 12 до 130 мм.

Деформирование может осуществляться инструментом в виде двух валков, валка и сегмента или двух плоских плит. Плоскоклиновой инструмент наиболее прост в изготовлении и обеспечивает получение валков сложной конфигурации с высокой точностью: допуски на диаметральные размеры 0,2…0,4 мм, на линейные 0,3…0,5 мм. Заготовка в виде круглого прокатанного прутка после нагрева автоматически перемещается в рабочую зону клиньев в их исходном положении. Клиновой инструмент, закрепленный в подвижной салазке станка, совершает прямолинейное движение и заготовка прокатывается между двумя клиновыми плитами.

Способ обратной поперечно-клиновой прокатки сопровождается набором металла с образованием ступени с диаметром, большим диаметра исходной заготовки. Как и при прямой прокатке, в заготовку вначале вдавливаются острые грани заходной части клиньев, образуя кольцевую канавку, а затем под действием их боковых поверхностей происходит расширение канавки и калибровка прокатываемого диаметра калибрующей плоскостью клиньев. Однако в отличие от обычного способа при обратной прокатке расширение канавки идет от концевых участков заготовки к центру, вследствие чего ее центральная часть находится под действием осевых сжимающих напряжений.

На начальной стадии деформация носит местный характер, образуя наплывы только в очаге пластической деформации.

При определенной степени обжатия осевые сжимающие напряжения превышают предел текучести материала заготовки, и в этом случае центральная часть заготовки начинает осаживаться, увеличиваясь в диаметре.

Поперечно-винтовая прокатка

При поперечно-винтовой прокатке (рис. 94) валки *1*, *2* расположены под углом и сообщают заготовке *3* при деформировании вращательное и поступательное движения.

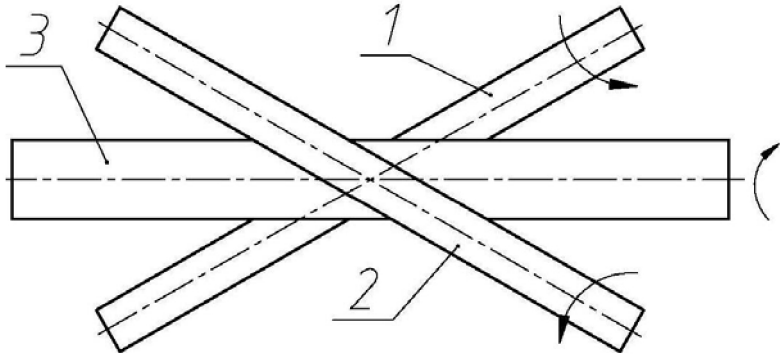


Рис. 94. Поперечно-винтовая прокатка: *1,2* – валки; *3* – заготовка

Благодаря наклону валков создается сила, продвигающая формуемую заготовку в осевом направлении. Это позволяет изготавливать также полые изделия (рис. 95).

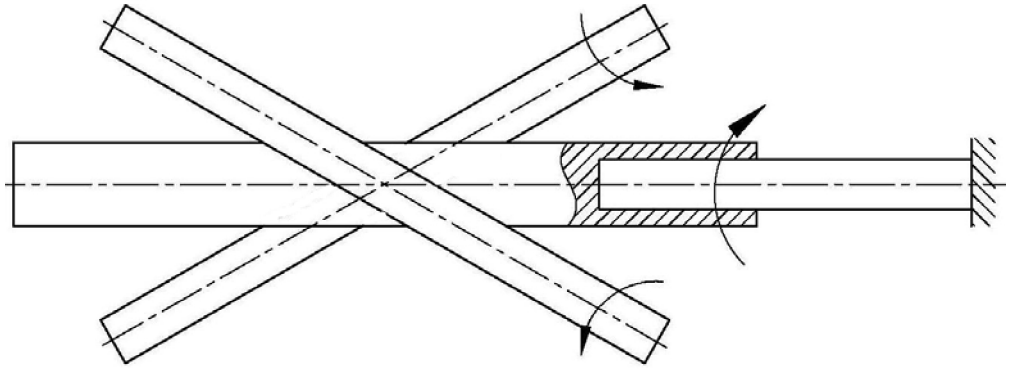


Рис. 95. Производство полых изделий поперечно-винтовой прокаткой

Процесс применяется, в частности, при производстве корпусов снарядов. В это направление большой вклад внесли сотрудники кафедры обработки металлов давлением МГТУ МИСиС.

При поперечно-винтовой прокатке изделий с винтовой поверхностью [4] применяются двухвалковая и трехвалковая схемы прокатки. При двухвалковой схеме прокатки заготовка между валками удерживается при помощи поддерживающих проводок или подвижных центров. При трехвалковой схеме прокатки необходимость в проводках отпадает.

При поперечно-винтовой прокатке изделий с винтовой поверхностью используют валки двух типов: с кольцевыми и винтовыми калибрами (ручьями). В зависимости от типа калибров валка и профиля на изделии с винтовой поверхностью возможны следующие схемы поперечно-винтовой прокатки.

По первой схеме валки имеют кольцевые калибры; угол перекоса осей валков равен углу подъема прокатываемого профиля на заготовке.

По второй схеме валки имеют винтовые калибры, направление которых – разноименное с направлением прокатываемого профиля. По этой схеме прокатка производится при меньших значениях угла перекоса осей валков по сравнению с прокаткой валками, имеющими кольцевые калибры. Это необходимо при прокатке изделий с большим углом подъема профиля.

По третьей схеме валки имеют винтовые калибры, направление которых разноименное с направлением прокатываемого профиля на изделии с винтовой поверхностью. Угол подъема профиля на заготовке меньше угла подъема винтовых калибров на валке. Эта схема используется наряду со второй схемой, однако требует более сложных в изготовлении многозаходных валков. Прокатка по этой схеме обычно производится при меньших величинах угла перекоса осей валков по сравнению с прокаткой валками, имеющими кольцевые калибры. Это обстоятельство позволяет уменьшить единичные радиальные обжатия заготовки.

Валками с кольцевыми калибрами (одним комплектом валков) возможно прокатывать левую и правую резьбы на заготовках разных диаметров, но с углом подъема резьбы не более 6-7°. При применении валков с кольцевыми калибрами не применяются высокие требования к синхронизации их вращения, что упрощает конструкцию их привода вращения. Однако такие валки сложны в изготовлении.

Валками с винтовыми калибрами (одним комплектом валков) также можно прокатывать резьбу различного диаметра за исключением тех размеров, для которых соблюдается равенство угла подъема винтовых калибров на валке и угла подъема резьбы на изделии.

Валки с винтовыми калибрами по сравнению с валками с кольцевыми калибрами имеют следующие преимущества:

1. Прокатка производится при меньших перекосах осей валков. Это важно при прокатке многозаходных резьб и червяков.

2. Прокатка валками с винтовыми калибрами производится при меньших величинах осевой подачи и радиального единичного обжатия заготовки, чем при прокатке валками с кольцевыми калибрами при одинаковом угле заборного конуса валков. Это имеет особое значение при холодной прокатке резьб, когда необходимо уменьшить единичное радиальное обжатие заготовки с целью снижения давления со стороны заготовки на валки, мощности привода вращения валков, а также из-за технологических соображений.

3. При одинаковых режимах прокатки (при равных единичных радиальных обжатиях) валки с винтовыми калибрами имеют меньшую ширину, чем валки с кольцевыми калибрами. Уменьшение ширины валков ведет к снижению сил при прокатке и мощности привода, благодаря чему становится возможным производить прокатку более крупных профилей с винтовой поверхностью на менее мощном и жестком оборудовании.

Таким образом, применение валков с винтовыми калибрами расширяет технологические возможности оборудования. Недостатком этих валков является необходимость высокой синхронизации их вращения при прокатке.

При холодной прокатке максимально допустимая деформация определяется пластическими свойствами материала заготовки. Степень деформации металла растет с увеличением шага и высоты прокатываемой резьбы.

В результате проведенных экспериментальных исследований и опыта промышленного внедрения процесса [4] установлена возможность холодной прокатки винтов с трапецеидальной и круглой резьбой на деталях из конструкционной углеродистой стали с шагом резьбы 10 мм.

При более высокой степени деформации наступает разрушение поверхностных слоев заготовки и резко снижается стойкость валков.

Окружная скорость валков при холодной прокатке крупных резьб является параметром, определяющим качество и точность прокатанной резьбы, стойкость валков и производительность процесса. Существуют оптимальные скорости прокатки, выше которых процесс прокатки становится невозможным. Интенсивная пластическая деформация металла, трение о проводки и скольжение по профилю валков, происходящие при больших давлениях, сопровождаются выделением тепла и нагревом прокатываемой заготовки до температуры 200-250 °С. С увеличением скорости прокатки температура заготовки повышается до еще больших значений. Большая деформация и высокая температура отрицательно влияют на точность и чистоту поверхности прокатанной резьбы и стойкость валков.

Оптимальные скорости при холодной прокатке крупной резьбы находятся в пределах 10-15 м/мин.

Холодная прокатка резьбы производится при обильном поступлении в зону пластической деформации охлаждающей жидкости, которая служит технологической смазкой валков, поддерживающих проводок и заготовки, отводит тепло и смывает с них остающиеся от прокатываемых заготовок грязь и частицы металла.

В качестве охлаждающей жидкости при холодной прокатке крупной резьбы рекомендуется применять сульфофрезол, обладающий сравнительно малой вязкостью и высокой смазывающей способностью.

При горячей прокатке вследствие высокой пластичности металла облегчается его течение и формирование на прокатываемой заготовке профиля с винтовой поверхностью.

Горячая прокатка производится при окружной скорости валков от 20 до 50 м/мин. Изменение скорости валков в указанных пределах не влияет на геометрию профиля и точность размеров прокатываемых резьб.

При горячей прокатке допускаются бóльшие величины радиального единичного обжатия (0,15-0,5 мм), чем при холодной прокатке.

В качестве технологической смазки применяют следующий состав: 2 вес. ч. графита марки С, 1 вес. ч. кальцинированной соды, остальное – вода.

Смазку разводят водой до тестообразного состояния. Графитосодовая смазка не горит и не выделяет дыма. Вследствие высокой вязкости она хорошо удерживается на поверхности калибров валка.

Поперечно-винтовая прокатка может быть применена для штамповки шариков для подшипников (рис. 96).

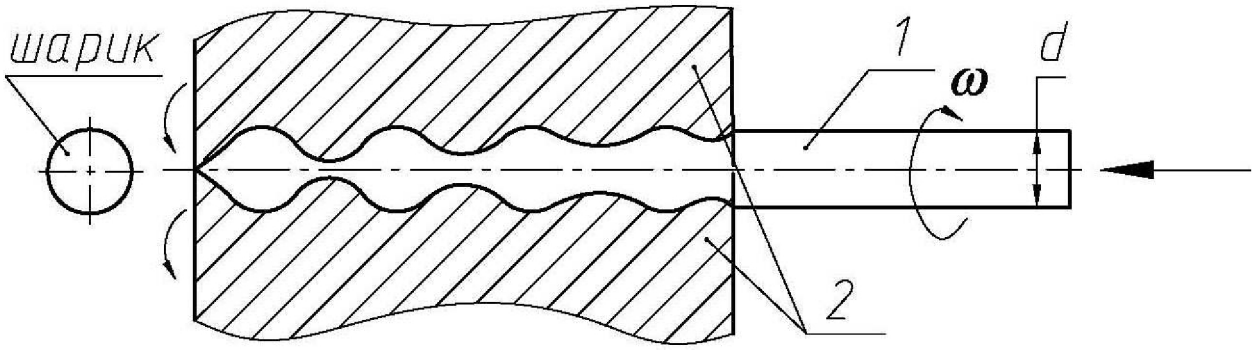


Рис. 96. Производство шариков поперечно-винтовой прокаткой:
1 - заготовка; *2* - валки

Объемная штамповка с обкатыванием (сферодвижная штамповка)

Такой штамповкой изготавливают осесимметричные детали (рис. 97). Пуансон вращается вокруг своей оси со скоростью ω_1, совершает обкатывающее движение вокруг оси заготовки *2* со скоростью ω_2 и перемещается поступательно вниз, деформируя заготовку *2* в матрице *3*.

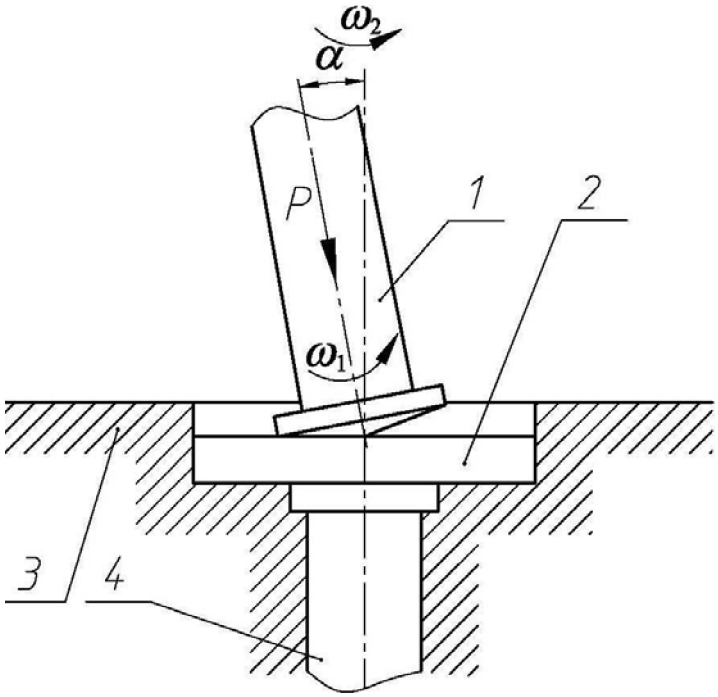


Рис. 97. Объемная штамповка с обкатыванием

Способы штамповки фланцев на трубных заготовках обкатыванием роликами

При обкатывании роликами *4* (рис. 98) трубную заготовку *3* устанавливают в матрицу *1* на задающий вращение шпиндель – выталкиватель *2* [52].

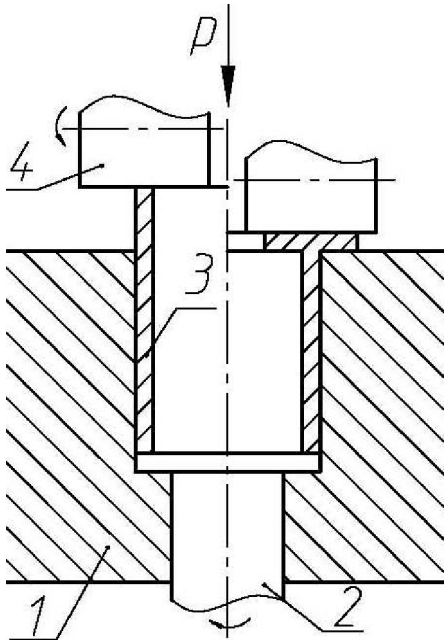


Рис. 98. Схема обкатывания роликами без ограничения формы формируемого фланца: *1* - матрица; *2* - вращающийся шпиндель; *3* - втулка-заготовка; *4* - ролик, совершающий обкатку

Недостатком является возможность вытекания металла во фланец как во внешнюю, так и во внутреннюю стороны.

Для ограничения течения металла внутрь применяют оправку [17].

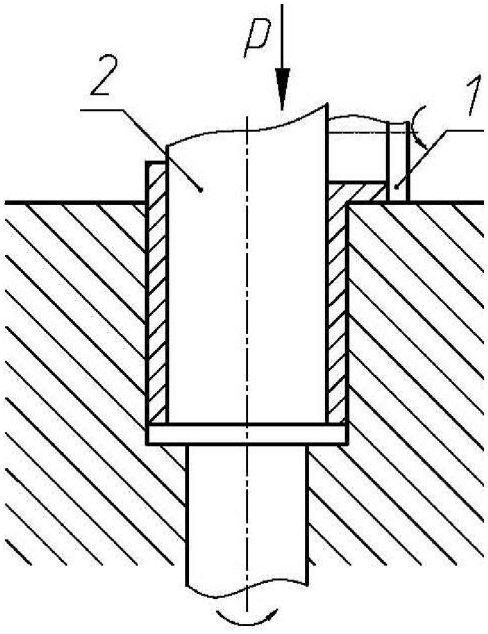


Рис. 99. Схема обкатывания роликом *1*, имеющим ступенчатую форму для ограничения размера фланца снаружи, размер внутри ограничен оправкой *2*

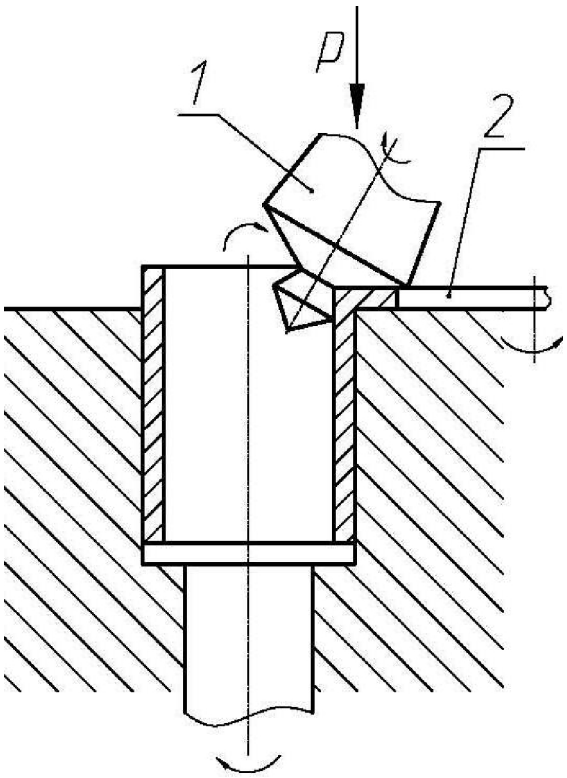


Рис. 100. Схема обкатывания инструментом *1*, совершающим сферодвижное перемещение, и роликом *2*, ограничивающим фланец снаружи

С целью ограничения формы фланца при обкатывании применяют способы, схематично изображенные на рис. 99, 100.

4.5. Штамповка с раскаткой

С помощью раскатки увеличивается диаметр кольцевой заготовки при одновременном уменьшении толщины кольца (рис. 101).

Верхний валок – неподвижный, нижний поджимает заготовку силой *P*.

При вращении валков *3* и постепенном подъеме нижнего валка последовательно уменьшается толщина стенки заготовки *1* и увеличивается ее диаметр. Диаметр заготовки увеличивается до тех пор, пока она не упрется в калибровочное кольцо *2*.

Раскатка кольцевых заготовок на раскатных станах получила особенно большое распространение при производстве колец подшипников. Заготовка *1* представляет собой кольцо с меньшим диаметром и большей толщиной стенки, чем у поковки. Заготовки под раскатку получают штамповкой на горизонтально-ковочных машинах или на молотах. При подведении к заготовке *1*, надетой на верхний валок *3*, быстровращающегося нижнего валка *3* заготовка и верхний валок *3* начинают вращаться. При дальнейшем сближении валков *3* увеличивается наружный диаметр заготовки за счет уменьшения толщины и происходит ее контакт с кольцом *2* или не показанным на рисунке дополни-

тельным внешним роликом, обеспечивающими получение правильной кольцевой формы поковки. После касания поковкой контрольного ролика (на рисунке не показан) раскатка прекращается.

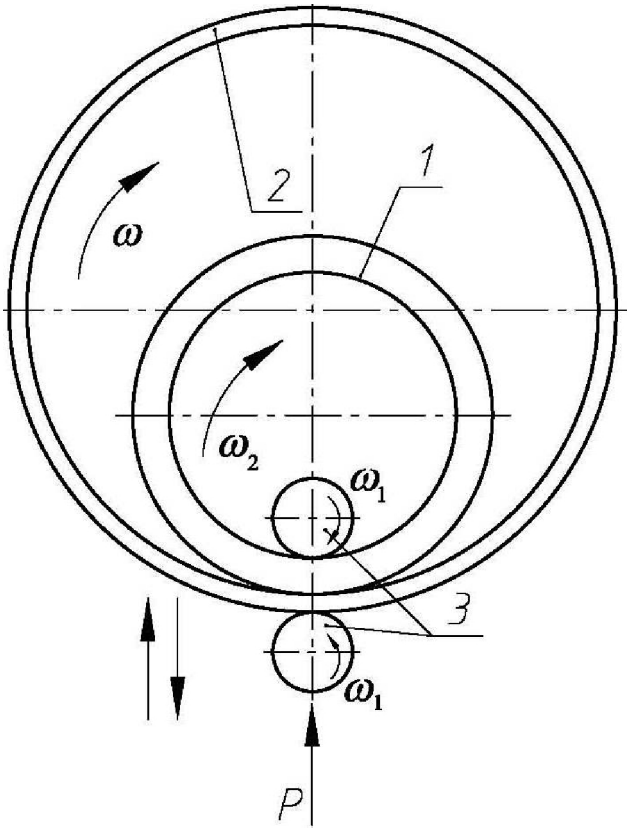


Рис. 101. Раскатка колец: *1* – обрабатываемая заготовка; *2* – калибрующее кольцо из закаленной инструментальной стали; *3* – валки

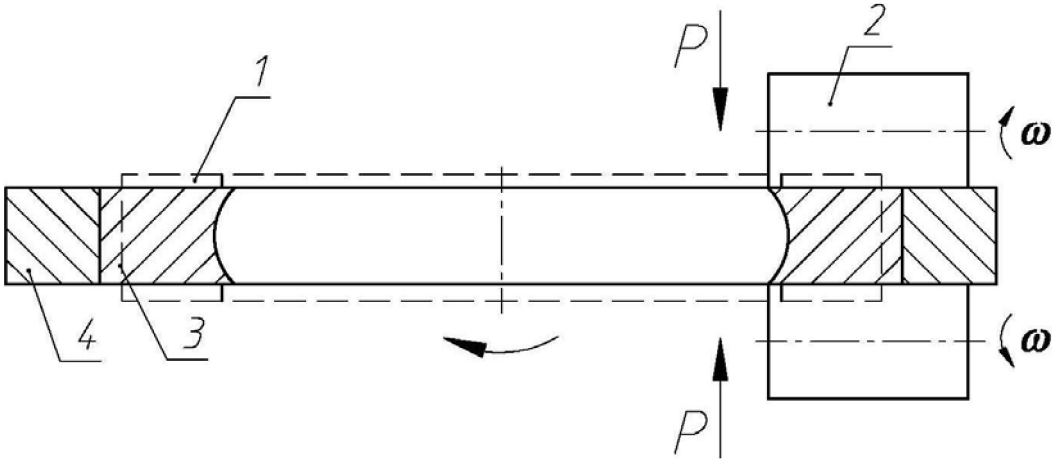


Рис. 102. Раскатка колец при воздействии валков на торцы заготовки

Раскаткой получают поковки колец с поперечными сечениями различной формы (зависящими от профиля валков) наружным диаметром 70…700 мм и шириной 20…180 мм.

Раскатка колец может быть также осуществлена по схеме, приведенной на рис. 102.

Заготовка *1* обрабатывается валками *2*, которые вращаются со скоростью ω. Заготовка за счет сил трения также приобретает вращательное движение. Высота заготовки уменьшается, а ее диаметр увеличивается до тех пор, пока внешняя поверхность не достигает калибрующего кольца *4*. Валки сближаются между собой за счет силы *P*. В результате обработки заготовка *1* приобретает форму поковки *3*.

Поскольку внутри заготовки отсутствует калибровочная оправка, то внутренняя поверхность поковки *3* имеет криволинейную форму.

4.6. Импульсные методы штамповки

Для сравнения процессов обычного и высокоскоростного деформирования необходимо рассмотреть: 1) влияние скорости на пластичность и прочность материала; 2) влияние скорости перемещения заготовки относительно штампа на трение; 3) стабильность геометрии детали; 4) влияние волнового характера протекания процесса.

В условиях динамического нагружения пластичность одних материалов увеличивается, других – уменьшается по сравнению с пластичностью при статическом нагружении. Хотя увеличение пластичности весьма желательно, основной задачей все же является получение отвечающих техническим условиям деталей требуемой формы из заданного материала и без превышения критической скорости деформирования. Независимо от изменения пластичности [6] предел текучести материала в условиях динамического нагружения увеличивается. В силу возрастания предела текучести материал с повышенной в условиях динамического нагружения пластичностью требует для своего высокоскоростного деформирования большей энергии деформации, чем при обычных статических методах.

Трение между заготовкой и рабочими поверхностями штампа является одним из главных факторов, влияющих на формообразование деталей. Коэффициент трения обычно уменьшается с увеличением скорости перемещения заготовки относительно штампа, но при этом возрастает температура поверхности и нарушается смазка. Однако при очень высоких скоростях температура контактной поверхности может достигать таких значений, при которых тонкие поверхностные слои заготовки и штампа расплавляются и действуют как смазка.

Стабильность геометрии можно оценить из сравнения равномерного удлинения цилиндрического с головками и полого цилиндрического образца при испытаниях на растяжение. При статическом испытании на растяжение в условиях осевого нагружения [60] цилиндрический образец равномерно растягивается до точки потери устойчивости, когда появляется местное утонение (шейка). При испытании на растяжение в условиях высокоскоростного нагружения, приближающихся к критической ударной скорости, у пластичных об-

разцов появляются утонения (шейки) как на закрепленном, так и на подвергающемся импульсу концах. При достижении критической скорости образец утоняется и разрушается на нагружаемом конце, что является проявлением неравномерной деформации.

В полых образцах, деформируемых давлением изнутри, напряжения распределяются равномерно. Высокая стабильность геометрии выражается в равномерном утонении образца по всей окружности, без шейки.

Волновая природа процесса играет существенную роль при формообразовании деталей такими высокоскоростными способами, которые рассмотрены в учебнике ниже.

Сейчас несколько слов об оценке характера влияния волн на физику процессов, происходящих в материале заготовки.

В общем случае увеличение скорости деформации вызывает рост предела текучести и предела прочности материала, так что характеристики динамической прочности могут значительно отличаться от соответствующих статических характеристик.

Работы Кларка и Вуда, испытывавших на растяжение образцы из разных металлов при скорости нагружения до 60 м/сек, показывают, что предел прочности испытуемого материала повышается при этом более чем на 54 % по сравнению со статическим нагружением [54]. Различия в условиях нагрева, подготовки и протекания процесса выливаются в значительный разброс величины отношения динамического предела прочности к статическому.

По характеру удлинения металлы могут быть разбиты на три группы. В первую группу входят металлы, у которых удлинение остается относительно постоянным при увеличении скорости нагружения до определенного предела, а затем резко падает до меньших, чем статические, значений. Примером может служить отожженная сталь. Вторую группу образуют металлы, у которых наблюдается значительный разброс удлинений при увеличении скорости нагружения. Начальное увеличение удлинения характеризуется общей кривой, затем наблюдаются значительные отклонения. К этой группе относятся закаленные стали. К третьей группе относятся металлы, у которых с увеличением скорости нагружения удлинение постепенно возрастает от значений, которые имели бы место при статическом нагружении, до максимальных значений, а затем также постепенно уменьшается. К этой группе относятся холоднокатаные металлы. Например, при скорости 30 м/с удлинение холоднокатаных сталей возрастает на 300 % по сравнению со статическим деформированием.

При операциях, в которых материал заготовки непосредственно контактирует с взрывчатым веществом, наблюдается высокая степень локализации воздействия. У материала наблюдается излом, вызванный волнами напряжений, увеличенная пластическая деформация, значительное механическое упрочнение, повышенные текучесть и удлинение. В зависимости от геометрии нагружения такие свойства могут возникать в небольшой зоне заготовки, в то время как свойства остальной части металла остаются обычными.

Такое поведение металла в процессе обработки может быть использовано в отдельных операциях. Например, для операции резки может быть использовано разрушение, вызываемое волнами напряжений.

В условиях эксплуатации металл после контактных операций в значительной мере отличается по своим техническим свойствам от исходного металла. При этом характеристики контактирующего слоя металла отличаются от характеристик слоев, более удаленных от взрывчатого вещества.

Штамповка взрывом

В отличие от штамповки на прессах, в гидростатах и газостатах, штамповка взрывом (ШВ) может применяться в нестационарных условиях. Используется только один инструмент (пуансон или матрица). В качестве второго инструмента используется подвижная среда. Широко применяется ШВ в судостроении. Благодаря высокой скорости деформирования при ШВ уменьшается упругое пружинение и увеличивается предельная пластичность обрабатываемого материала, хорошо заполняются тонкие ребра [10]. Формоизменение при ШВ происходит не столько вследствие скольжения в зернах по плоскостям скольжения, сколько вследствие двойникования.

Взрывчатые вещества включают в себя: бризантные (тротил, динамит, аммонит); метательные (порох); инициирующие (азид свинца, гремучая ртуть); горючие газовые смеси (метан с кислородом, водород с кислородом).

При использовании порохов и газовых смесей могут быть горение и детонация. В первом случае скорость 10 – 12 м/с, во втором – 3 – 3,5 км/с.

Контактная штамповка БВВ показана на схеме на рис. 103.

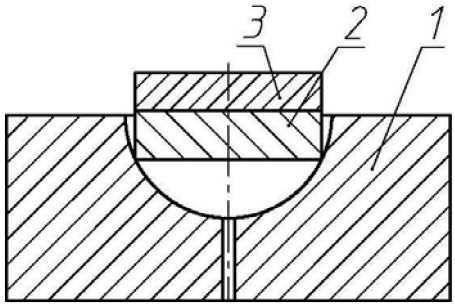


Рис. 103. Схема контактной штамповки БВВ: *1* - матрица; *2* - заготовка; *3* - БВВ

Давление на поверхность заготовки (10^4…10^5) МПа действует в течение нескольких микросекунд. Формоизменение металла связано как с непосредственным воздействием давления, так и с последующим распространением волн напряжений [8]. При таком воздействии заготовка разрушается, поэтому схема в производстве изделий не применяется.

С целью снижения давления применяется штамповка с использованием воздуха в качестве передающей среды (рис. 104).

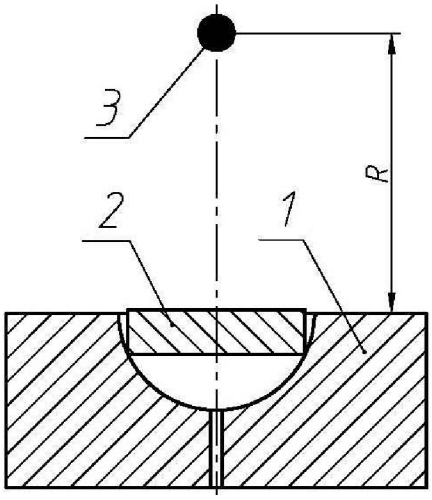


Рис. 104. Схема штамповки с использованием воздуха в качестве передающей среды:
1 - матрица; *2* - заготовка; *3* - БВВ; *R* - подбираемое расстояние

Давление на поверхность заготовки (100…3000) МПа. Разгон и последующая деформация заготовки определяются внешними силами. Волны напряжений в заготовке незначительны.

В качестве передающей среды могут быть использованы жидкость или сыпучий материал. В этих случаях изображенное устройство помещают в бронированный контейнер, заполненный, соответственно, водой или сыпучим материалом.

При использовании в качестве передающей среды жидкости или сыпучего вещества давление на заготовку в несколько раз больше, чем при использовании воздуха. Обычно жидкой передающей средой служит вода (рис. 105), которая предотвращает проникновение продуктов взрыва в металл заготовки и уменьшает звуковой эффект. Сыпучие среды (песок, металлические порошки) применяют при штамповке с подогревом.

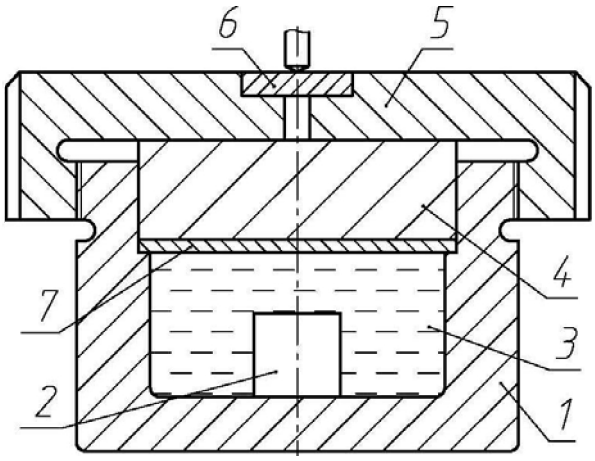


Рис. 105. Штамповка взрывом с использованием воды в качестве передающей среды:
1 - корпус; *2* - заготовка; *3* - вода; *4* - БВВ; *5* - крышка, навинченная на резьбу;
6 - капсюль; *7* - мембрана, разделяющая воду и БВВ

Для БВВ нет необходимости отвода образовавшихся газов.

При штамповке крупных заготовок устройство помещают в специальный бассейн [6] с бронированным корпусом (рис. 106).

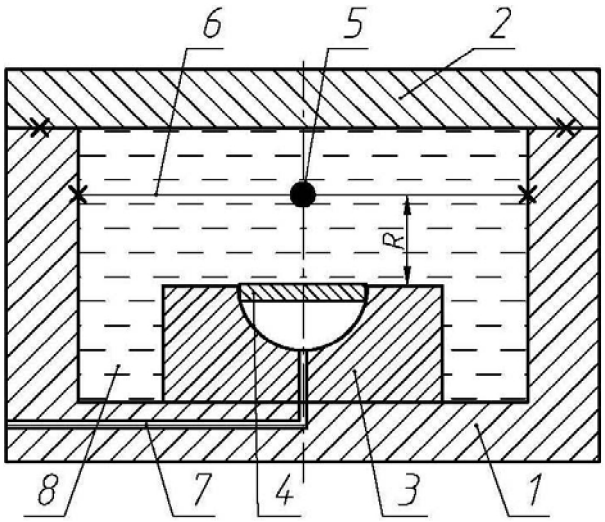


Рис. 106. Штамповка крупногабаритных заготовок: *1* - корпус бассейна; *2* - крышка корпуса, прикрепляемая к корпусу стяжными болтами; *3* - матрица; *4* - деформируемая заготовка; *5* - БВВ (заряд); *6* - устройство крепления заряда; *7* - канал для выхода воздуха; *8* - вода

Расчет технологического процесса состоит в определении массы заряда и расстояния R между зарядом и заготовкой.

Удаление воздуха в процессе штамповки путем его вытеснения самой заготовкой применяется редко. Кратковременность процесса взрывного деформирования приводит к тому, что воздух не успевает выйти из матрицы и происходит недоштамповка детали. Поэтому воздух из матрицы удаляют с помощью вакуумного насоса. При этом между заготовкой и матрицей прокладывают уплотнительные кольца.

Бассейны бывают цельнометаллическими или железобетонными с металлической облицовкой. Обычно диаметр бассейна в 2 – 3 раза превышает габариты штампуемых деталей. Глубина бассейна должна обеспечить достаточную высоту столба воды над заготовкой и зарядом БВВ.

Металлические бассейны заглубляют в грунт, опуская в бетонированные ямы. При этом пространство между стенками бассейна и бетонированной ямы засыпают песком. Между днищем металлического бассейна и бетонным фундаментом обычно помещают амортизирующие материалы (резину, дерево).

Развитие взрыва в воде и его взаимодействие с заготовкой показано на рис. 107.

Ударная волна от взрыва БВВ распространяется в воде по сферическому фронту со скоростью около 1500 м/с. Вслед за распространением ударной волны происходит расширение продуктов детонации – образуется газовый

пузырь. Газовый пузырь вначале расширяется, но когда давление в нем становится меньше гидростатического давления в жидкости, он начинает сжиматься.

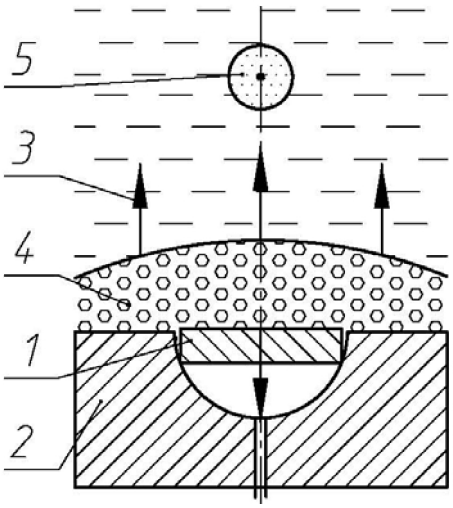


Рис. 107. Схема развития взрыва в воде: *1* - заготовка; *2* - матрица; *3* - отраженная ударная волна; *4* - область кавитации; *5* - газовый пузырь

Происходят пульсации газового пузыря.

Механизм передачи энергии к заготовке зависит от расстояния между зарядом и заготовкой. При расстояниях меньше 10 радиусов заряда энергия передается ударной волной, гидропотоком и газовым пузырем. При расстояниях свыше 60 радиусов – только ударной волной. При расстояниях больше 10 радиусов и меньше 60 – ударной волной и гидропотоком.

Ударная волна, достигнув заготовки, частично расходуется на деформацию заготовки, а частично отражается. Если заготовка податлива, она может оторваться от воды, в этом случае образуется зона кавитации.

Кавитация – образование пустот в движущейся жидкости. При образовании кавитации давление на заготовку падает до нуля и ее движение замедляется. Однако через некоторое время гидропоток догоняет заготовку и сообщает ей дополнительный импульс. Это необходимо учитывать при расчете расстояния от заготовки до заряда БВВ.

Заряд БВВ обычно имеет форму сферы, сплошного или полого цилиндра, конуса, листа, шнура и определяется формой изделия. Например, для изделия с протяженной выемкой нужен заряд в виде шнура или стержня.

Для успешной штамповки необходимо регулировать время воздействия ударной волны, так как существует некоторая максимальная энергия, которую может выдержать заготовка за определенное время.

Возможно осуществление штамповки метанием передающей среды [7] (рис. 108).

Штамповка метанием передающей среды позволяет регулировать нагрузку изменением массы передающей среды, осуществлять штамповку нагретой заготовки с помощью жидкой передающей среды.

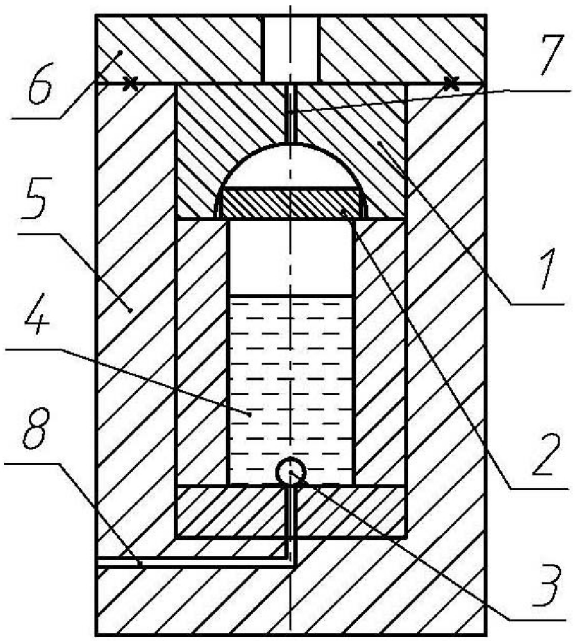


Рис. 108. Схема штамповки метанием воды: *1* - матрица; *2* - заготовка; *3* - заряд БВВ; *4* - вода; *5* - корпус; *6* - крышка корпуса, прикрепленная болтами; *7* - канал для отвода воздуха; *8* - канал для подвода детонирующей струи

Штамповка взрывом в песке осуществляется по схеме, приведенной на рис. 109.

Все устройство размещается в бронированной яме и предназначено для ГОШ заготовки *3*. Нагретую заготовку надевают на пуансон и засыпают песком до высоты заряда *4*. Затем устанавливают заряд, засыпают песком до нужной высоты и закрывают крышку.

При подрыве заряда *4* происходит как деформирование заготовки *3*, так и разрушение корпуса *7*. При этом песок ударяет по стенкам бронированной ямы и осыпается на пол вокруг установки.

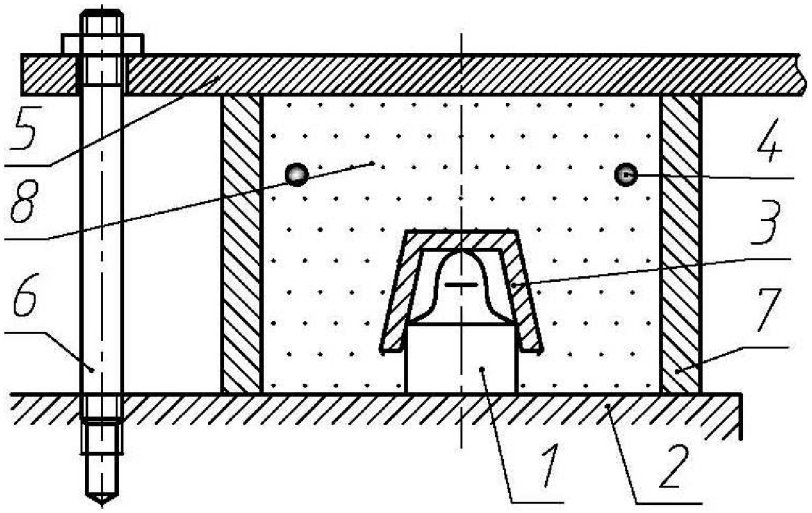


Рис. 109. Схема штамповки взрывом в песке: *1* –пуансон; *2* – основание установки ВШ; *3* – заготовка; *4* – БВВ (кольцевой заряд); *5* – верхняя крышка; *6* – стяжные шпильки; *7* – разрушаемый (одноразовый) корпус; *8* – песчаная передающая среда

Штамповка пороховыми зарядами, в отличие от БВВ, осуществляется путем давления на заготовку газов, выделяющихся при сгорании. Это давление существенно ниже, чем при детонации БВВ, поэтому штамповку пороховыми зарядами применяют при деформировании листовых заготовок.

В нашем курсе методов и устройств объемной штамповки сжигание порохов применяют в качестве источника энергии в пресс-пушках [8]. Это нечто похожее на копер, но снаряд (боек) разгоняется под действием давления пороховых газов, перемещается по гладкому каналу ствола и ударяет по жидкости, находящейся над заготовкой. Жидкость осуществляет деформирование заготовки. Однако энергии, генерируемой в жидкости, достаточно только для объемной штамповки легкодеформируемых материалов (p = 300…500 МПа).

При штамповке горючими газовыми смесями может быть использован взрыв, подобно детонирующим ВВ, или газовые смеси могут использоваться в условиях горения. Второе, как и пороха [порох. копер], применяется для листовой штамповки, поскольку при горении скорость воздействия на заготовку (и энергия) существенно ниже, чем при детонации. Детонация газовых смесей может быть использована при деформировании небольших заготовок, когда оснастка обеспечивает достаточную прочность.

Схема детонационного газового пресса [16] приведена на рис. 110.

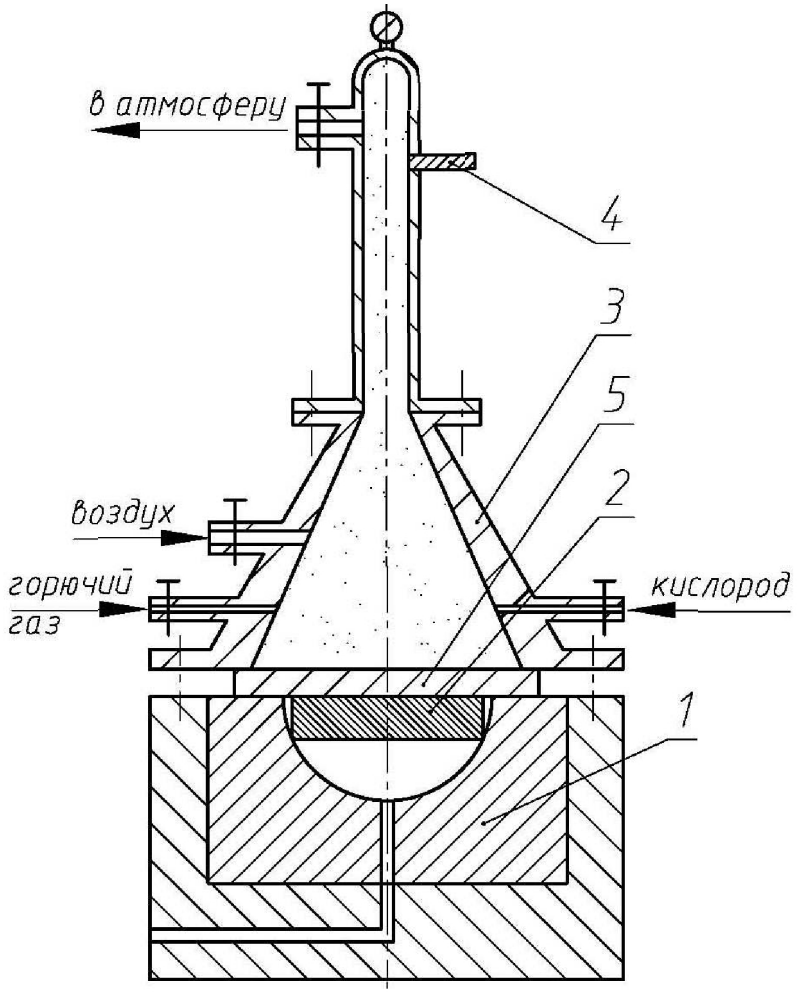


Рис. 110. Схема детонационного газового пресса: *1* - матрица; *2* - заготовка; *3* - камера сгорания; *4* - запальное устройство; *5* - герметизирующая мембрана

Газовая смесь может быть подготовлена к взрыву в кратчайшее время без специальных устройств. Смесь заполняет емкость, что исключает влияние формы заряда и расстояния до его центра.

Уплотнение порошков взрывом [6] стали изучать после опубликования в 1956 г. работы [59]. В ней изучалось влияние возникающих при взрыве давлений на физические и химические свойства вещества. Отмечался ряд очень интересных явлений, в том числе химическое превращение. С этого времени уплотнением порошков взрывом начали заниматься многие исследователи.

Уплотнение порошков взрывом имеет перечисленные ниже преимущества.

1. Возможность получения чрезвычайно высоких давлений.

2. Площадь формуемого объекта при заданном давлении не ограничивается максимальной силой установки, как в случае применения гидравлического пресса.

3. Для трудноуплотняемых другими способами материалов, например вольфрама и молибдена, возможно получение плотностей до 96 % от теоретически возможной плотности.

4. Благодаря достижению высоких плотностей формованных заготовок значительно уменьшается усадка при их спекании.

5. Поскольку можно получать поверхности с низкой шероховатостью, сокращается количество отделочных операций.

6. Открывается возможность формования порошков металлов, керамики, керметов и графитовых материалов.

Для формования высоких тонкостенных порошковых втулок применяют магнитно-импульсную штамповку (рис. 111).

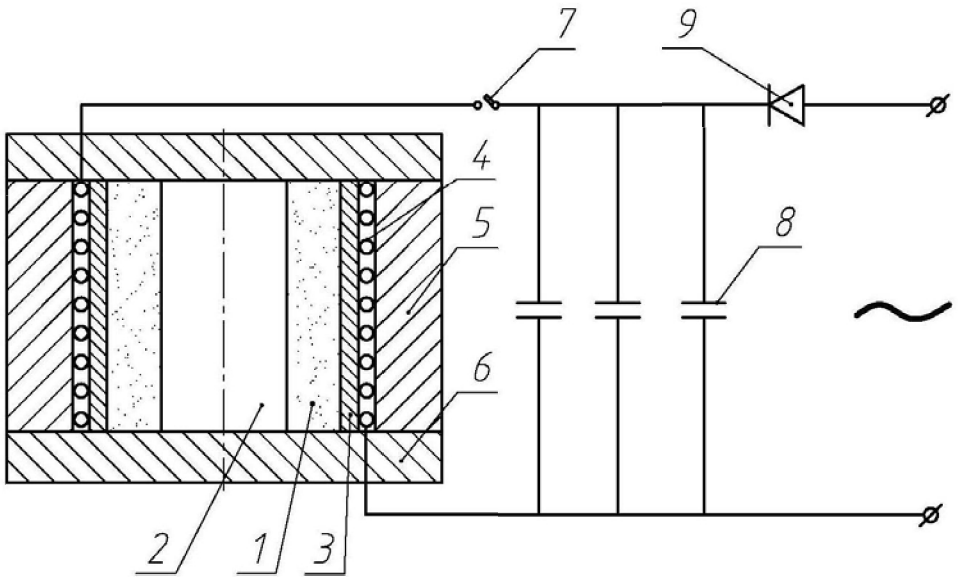


Рис. 111. Схема устройства магнитно-импульсной штамповки порошковых втулок:
1 – засыпанная между оправкой *2* и втулкой *3* порошковая заготовка; *4* – индуктор;
5 – обойма; *6* – крышки; *7* – разрядник; *8* – конденсаторная батарея;
9 – выпрямитель электрического тока

В установке для магнитно-импульсной штамповки через повышающий высоковольтный трансформатор и выпрямитель производят зарядку конденсаторной батареи, состоящей из групп параллельно включенных между собой импульсных конденсаторов. По окончании зарядки конденсаторная батарея с помощью специального коммутирующего устройства-разрядника разряжается на индуктор, внутри которого размещена заготовка.

В момент разряда через индуктор проходит импульсный ток, который приводит к возникновению вокруг витков индуктора мощного импульсного электромагнитного поля. При этом в металле заготовки индуцируются вихревые токи. Наведенный в заготовке ток подчиняется закону Ленца, т.е. выбирает такие пути и направления, чтобы как можно сильнее противодействовать причине, которая его вызывает. В результате взаимодействия токов встречного направления образуются отталкивающие электромеханические (пондеромоторные) силы, которые одинаково воздействуют как на заготовку, так и на индуктор. Если при этом прочность индуктора значительно выше прочности заготовки, то пондеромоторные силы деформируют заготовку.

Результаты исследований и опыт внедрения магнитно-импульсной штамповки выявили ряд ее преимуществ по сравнению с другими методами обработки металлов давлением. К ним относятся следующие:

1) небольшие первоначальные капиталовложения;

2) значительное снижение металлоемкости применяемой оснастки благодаря использованию при операциях штамповки или одной матрицы, или одной оправки, что существенно снижает сроки подготовки производства;

3) возможность точного и плавного регулирования давления и времени его действия;

4) высокая точность и стабильность повторения выполняемых операций, что позволяет использовать процесс и оборудование в серийном и массовом производстве ответственных деталей;

5) легкая встраиваемость оборудования в поточно-механизированные и автоматические линии с достаточно высокой производительностью;

6) отсутствие поверхностного контакта заготовки с инструментом, что позволяет вести обработку полированных заготовок, заготовок с покрытиями и т.п.;

7) повышение показателей штампуемости для ряда материалов по сравнению со статическим деформированием;

8) простота осуществления концентрации давления на отдельных участках заготовки получения потребной эпюры давления;

9) простота обслуживания магнитно-импульсных установок и высокая культура производства.

В результате воздействия падающей и отраженной волн заготовка пластически деформируется и принимает форму полости матрицы.

Когда происходит разряд в индукторе, наводится электрическое поле во втулке *3*. Поскольку индуктор не может расшириться (его удерживает обойма

5), то двигаться внутрь приходится втулке *3*. Если бы между втулкой и обоймой не было порошковой заготовки, то это была бы обычная операция листовой штамповки – сборка между собой внутренней детали *2* и втулки *3*. В данном случае между ними находится порошковая заготовка *1*, которая получает уплотнение.

Если бы не было втулки *3*, которую еще называют спутником, то поле в порошковой заготовке было бы слабым из-за наличия пор. Это самый эффективный способ уплотнения высоких тонкостенных порошковых втулок, поскольку при уплотнении в штампах сила контактного трения не позволяет хорошо уплотнить среднюю, наиболее удаленную от торцов часть заготовки.

Магнитно-импульсная штамповка отличается возможностью очень точного дозирования силы воздействия на заготовку.

Электрогидравличесая штамповка

Во всех рассмотренных процессах с использованием приблизительно таких же схем размещения источников ударной волны могут быть использованы не заряды взрывчатого вещества, а электроды [6]. Тогда процесс носит название электрогидравлической штамповки (рис. 112) [31, 51].

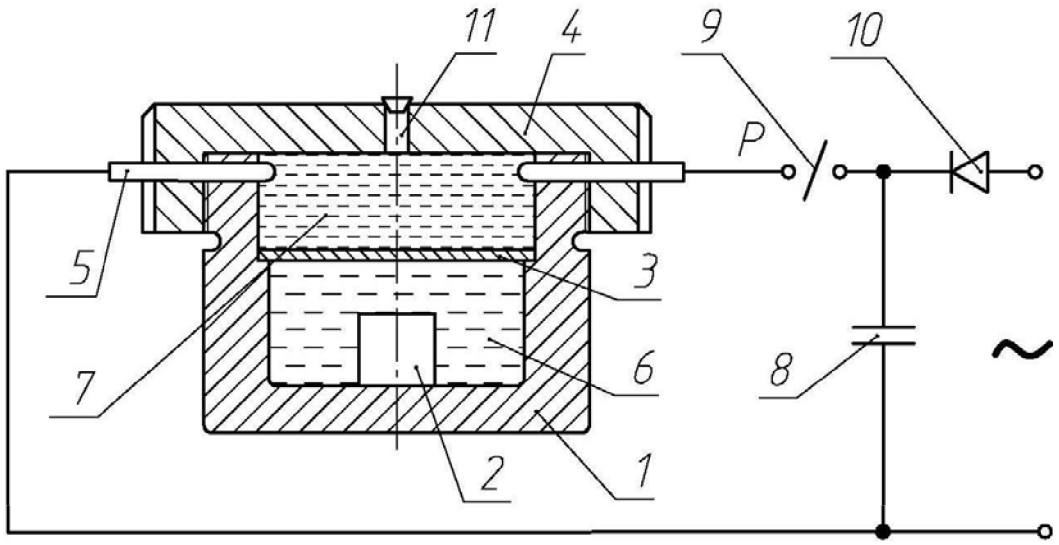


Рис. 112. Схема процесса электрогидравлической штамповки: *1* – корпус; *2* – штампуемая заготовка; *3* – мембрана; *4* – крышка с каналом *11* для залива воды, со шлицами, чтобы завернуть ее по резьбе; *5* – электроды; *6* – жидкость, осуществляющая штамповку; *7* – вода, в которой происходит электрический разряд; *8* – конденсаторная батарея; *9* – разрядник; *10* – выпрямитель электрического тока; 12 – заглушка

Процесс электрогидравлической штамповки заключается в превращении электрической энергии в механическую в жидкой среде. Разряд в виде электрической дуги в жидкости вызывает появление ударных волн и соответствующих давлений, которые могут быть использованы для деформирования металлов. При этом можно производить разряд конденсатора через зазор в жидкости и можно производить разряд конденсатора через проволочку.

При разряде через зазор в жидкости разность потенциалов в 50 кВ пробивает воздушный зазор приблизительно в 25 мм. Величина пробиваемого промежутка в жидкости определяется не только напряжением, но зависит также от проводимости среды и формы электродов. При применении этого метода обычно используются напряжения от 10 до 30 кВ.

При разряде через проволочку достигается лучшее управление процессом, так как путь электрического разряда может быть предопределен по направлению и форме. В этом методе обеспечивается более эффективное превращение энергии, что позволяет снизить рабочие напряжения, так как при наличии проволочки одно и то же напряжение перекроет большее межэлектродное расстояние, чем без проволочки. Эти преимущества с избытком перекрывают недостаток метода, заключающийся в необходимости заменять проволочку после каждого удара в случае формовки деталей, требующих многократных разрядов.

Благодаря тому, что предусмотрена мембрана *3*, в эксперименте можно использовать разные рабочие жидкости *6* и *7*. На контакты при взрывной штамповке на вход подается напряжение от 5 до 40 кВ. В силу прохождения электрического тока происходит разогрев в некотором канале между электродами. Этот разогрев сопровождается тем, что величина тока возрастает и еще более усиливает разогрев. Температура может достигать 10^4К. При этом в канале вода преобразуется в плазму [30]. Эффект колебаний, вызываемых плазмой, распространяется на большие расстояния. В целом эффект не меньше, чем от действия бризантного взрывчатого вещества. Канал, который образуется и по которому будет проходить разряд, может иметь неправильную форму. Чтобы упорядочить движение между электродами, ставят инициатор – тонкий провод, припаиваемый к электроду, который перегорает в первую же секунду [53]. Создаваемая энергия составляет $10^2 – 10^5$Дж за время $10^{-7} – 10^{-4}$с.

4.7. Навивка пружин на автоматах

Пружинные материалы должны обладать устойчивыми во времени упругими свойствами, значительной прочностью, а также пластичностью.

Холодным способом навивают пружины из проволоки до 16 мм. Проволоку применяют как предварительно упрочненную до навивки, так и в отожженном состоянии. При изготовлении из упрочненной проволоки пружины после навивки подвергают низкотемпературному отпуску. В результате увеличивается упругий участок нагружения пружины, так как проходит искусственное старение, и по плоскостям скольжения выпадают мелкодисперсные карбидные частицы.

При изготовлении из неупрочненной проволоки пружины подвергают закалке и отпуску. Пружины из патентированной проволоки подвергают только отпуску [24].

Патентирование проволоки выполняется обычно на заводе-изготовителе проволоки. Оно заключается в нагреве стали до температуры выше интервала превращений с последующим охлаждением в ванне из расплавленного свинца или соли, либо на воздухе. Патентированием достигается повышение способности металла к холодной пластической деформации, а также улучшение физико-механических свойств.

Для упрочнения самой проволоки применяют два способа: мартенситное превращение в результате закалки и отпуска и деформационный наклеп в результате волочения.

В зависимости от механических свойств установлены 4 класса проволоки: I, II, IIа, III. Проволока I класса наиболее прочная.

Из материалов, предназначенных для холодной или горячей навивки с последующей закалкой и отпуском готовой пружины, наиболее распространены прутки или проволока из кремнистых или хромованадиевых сталей 60С2А, 70С3А, 65С2ВА, 50ХФА. Для удешевления производства применяют пружинные стали 65Г, 65ГА.

Если навивка производится вгорячую, реализуют процесс ВТМО (высокотемпературной термомеханической обработки). В этом процессе закалку проводят сразу после пластической деформации, не допуская остывания заготовки. При этом закалка наследует полученную в процессе пластической деформации структуру мелких фрагментированных частиц.

Чтобы пружины не были хрупкими, реальный диапазон их твердости HRC42…48, что соответствует $\sigma_B = 1400…1760$МПа. Формула связи между σ_B и HRC следующая:

$$\sigma_B = [0{,}13(HRC)^2 - 5{,}8HRC + 155]10 \text{ МПа}.$$

Современная технология термообработки пружин позволяет получить узкий диапазон твердости. Поэтому расчет пружин проводят по минимальному значению в диапазоне твердости. От твердости пружины следует отличать значение твердости материала до изготовления пружины, существенное колебание которого недопустимо, так как то колебание оказывает влияние на протекание процесса навивки.

При применении проволоки I класса с более высоким пределом прочности нужна оправка меньшего диаметра. При применении проволоки II класса диаметр оправки нужно увеличить. Важна также стабильность механической прочности по длине проволоки. Поэтому для изготовления пружин из сталей, закаливаемых после навивки, часто проводят стабилизационный отжиг проволоки в печах с защитной атмосферой.

Стабильность упругих свойств пружинных материалов или самих пружин проверяют при холодном или температурном заневоливании на 24…48 часов. Процент потери пружиной сопротивления нагрузке не должен превышать заданного.

Наибольшей устойчивостью к релаксации напряжений обладают пружинные стали с содержанием ванадия (50ХФА, 70ХГФА).

Наименьшей устойчивостью к релаксации напряжений при обычной температуре обладают пружины, изготовленные из высоконагартованной проволоки I класса.

Динамическая прочность, выносливость или долговечность – важнейший показатель для пружин с многоцикловой нагрузкой. Чаще всего на выносливость испытывают не проволоку, а сами пружины.

Существуют следующие способы повышения несущей способности и выносливости пружин, рассмотренные ниже.

Заневоливание – сжатие до соприкосновения витков и выдержка в таком состоянии в течение 24…48 часов. Напряжения на наружных поверхностях витков близки к условному пределу текучести, поэтому за длительное время они частично релаксируют. Пружина после разгрузки уменьшается по высоте, но при дальнейшей эксплуатации не меняет своих упругих характеристик.

Пластическая холодная осадка пружин, навитых с шагом большим, чем требуется, также является последней операцией изготовления. Осадку производят до соприкосновения витков, при этом деформация наружных волокон сечения витка превышает упругую деформацию на 50…100 %. Осадку проводят однократную или трехкратную без значительной выдержки во времени. При разгрузке осаженной пружины сердцевина ее витков, деформированная упруго, стремится освободиться от напряжений и вернуться в исходное положение, что не может осуществиться полностью, так как данный процесс тормозится пластически деформированными наружными слоями витков. Происходит действие так называемых остаточных напряжений I рода.

Возникшие остаточные напряжения, складываясь с напряжениями от рабочего нагружения, уменьшают последние, что позволяет повысить допустимую нагрузку пружины при эксплуатации.

Термоосадка: пружину перед осадкой нагревают до температуры 300…400 °С, дополнительно реализуется эффект НТМО (низкотемпературной термомеханической обработки).

Дробеструйный или *дробеметный наклеп* наиболее распространен из всех методов поверхностного упрочнения пружин. На поверхности витков создаются остаточные напряжения сжатия, препятствующие раскрытию усталостных трещин и повышающие предел выносливости на 40…80 %.

С увеличением скорости, увеличением диаметра дроби и с уменьшением предела прочности обрабатываемого пружинного материала глубина наклепа увеличивается. После наклепа пружины подвергают низкотемпературному отпуску при 180…220 °С в течение 30 минут.

Гидроабразивную обработку осуществляют воздействием на поверхность пружин струей жидкости, подающейся под давлением и содержащей абразивные зерна. Глубина наклепа меньше, чем при дробеструйной обработке. Но здесь существенней повышается коррозионная стойкость пружин.

Пружины навивают из мотка проволоки на пружинонавивочных станках. Пружинонавивочные станки работают в автоматическом цикле, изготавливая пружины правой или левой навивки, заданных форм, диаметра и шага. Основными узлами пружинонавивочного станка являются электрический привод, правильный, навивочный, шаговый и отрезной механизмы. Правильный механизм образован несколькими парами роликов с канавками. Подающий механизм (обычно две пары подающих роликов и иногда направляющих планок) перемещает проволоку к навивочному механизму. Величину шага навиваемой пружины устанавливает шаговый механизм. Навитая пружина отрезается от мотка проволоки резцом отрезного механизма. Правильные и подающие ролики и направляющие планки – сменные, устанавливаются при наладке станка соответственно диаметру проволоки.

Некоторые пружинонавивочные станки снабжены насосом для подачи охлаждающей жидкости к навивочному механизму для охлаждения проволоки, нагревающейся при деформации. Скорость работы пружинонавивочного станка устанавливается при помощи коробки скоростей или бесступенчатого вариатора.

Винтовые пружины можно навивать на оправку по схеме «растяжение + изгиб» (рис. 113) и с помощью подающих роликов на упорные штифты по схеме «сжатие + изгиб» (рис.113, 114).

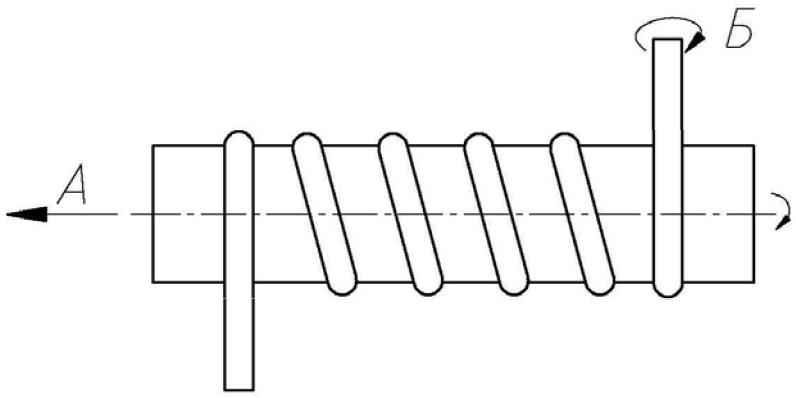


Рис. 113. Навивка пружины на оправку по схеме "растяжение + изгиб"

Навивку на вращающуюся оправку применяют в автоматах для навивки пружин кручения.

Развод витков осуществляют смещением оправки по стрелке А. Если осуществлять скручивание проволоки (по стрелке Б), то можно получить пружины с межвитковым давлением (с предварительной нагрузкой витков).

Недостатком навивки на оправку является невозможность регулирования диаметра без смены оправки.

Способ навивки по схеме «изгиб + сжатие» не имеет этих недостатков и получил наибольшее распространение.

Одноштифтовая (одноупорная) схема навивки показана на рис. 114.

Проволока *1* подается роликами с канавками. Она поджимается к оправке *2* с помощью упора *3*.

Упор отводится от вертикальной (по схеме) оси оправки на угол φ_1. Величину угла φ_1 можно увеличивать до тех пор, пока проволока не потеряет своего контакта с оправкой в правой нижней четверти на схеме. Клин *4* устанавливают между первым витком и направляющей планкой.

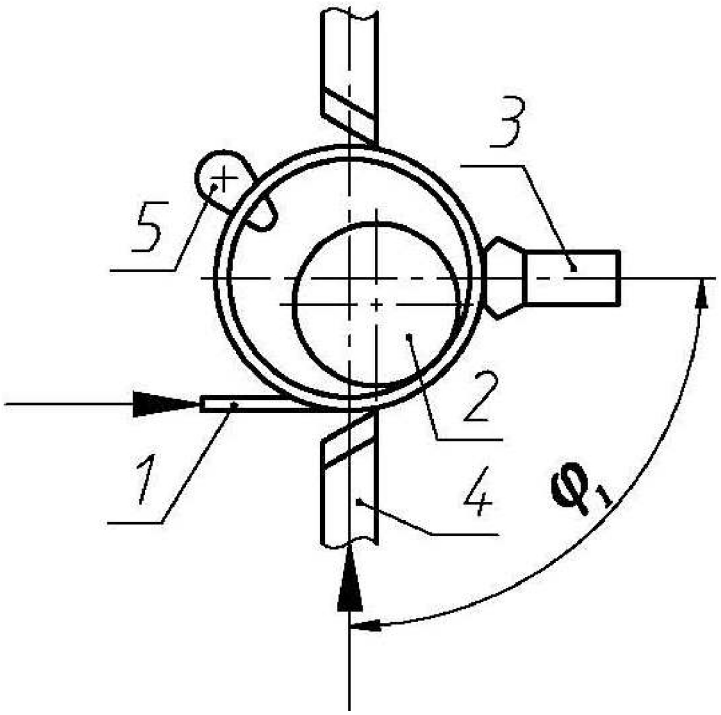


Рис. 114. Навивка (одноштифтовая) по схеме "сжатие + изгиб":
1 - проволока; *2* - оправка; *3* - упор; *4* - клин, задающий шаг пружины;
5 - шаговая лапка, перемещающаяся вдоль оси спирали

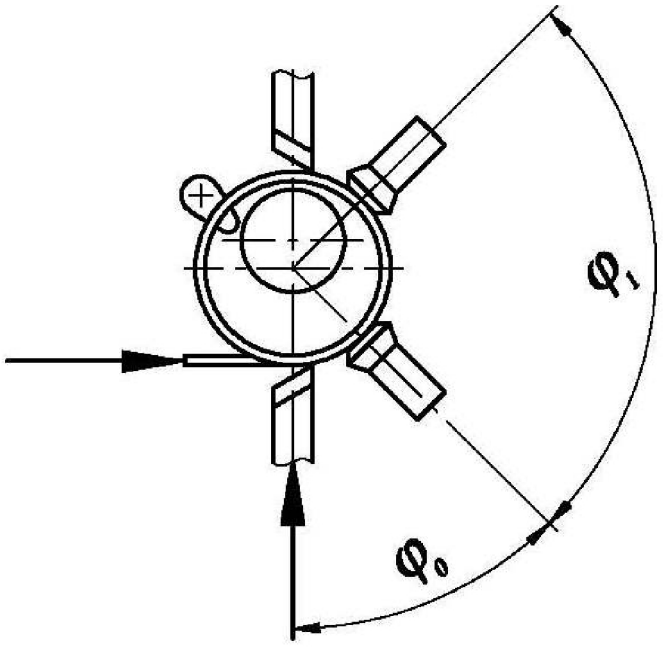


Рис. 115. Навивка (двухштифтовая) по схеме "сжатие + изгиб"

Если контакт нарушится, то необходим второй упор, чтобы калибровать диаметр витка пружины. В этом случае переходят к двухштифтовой (двухупорной) схеме навивки, которая показана на рис. 115.

4.8. Изготовление отрезкой от прутка цилиндрических заготовок высокой точности

Назначение заготовки и требования к ее качеству учитывают при выборе способа, схемы и параметров процесса отрезки. В порядке повышения точности отрезаемой заготовки следуют неполностью открытая отрезка, неполностью закрытая отрезка с пассивным поперечным зажимом, неполностью закрытая отрезка с активным поперечным зажимом без редуцирования прутка, неполностью закрытая отрезка с активным поперечным зажимом и редуцированием прутка, неполностью закрытая отрезка с повышенной скоростью (> 2 м/с), неполностью закрытая отрезка с последующими осадкой или выдавливанием заготовки. Наиболее высокие требования к точности заготовки даже при малом отношении ее высоты l к диаметру d (l / d = 0,2…0,6) может обеспечить только закрытая отрезка.

Схема операции закрытой отрезки с осадкой в ножах приведена на рис. 116.

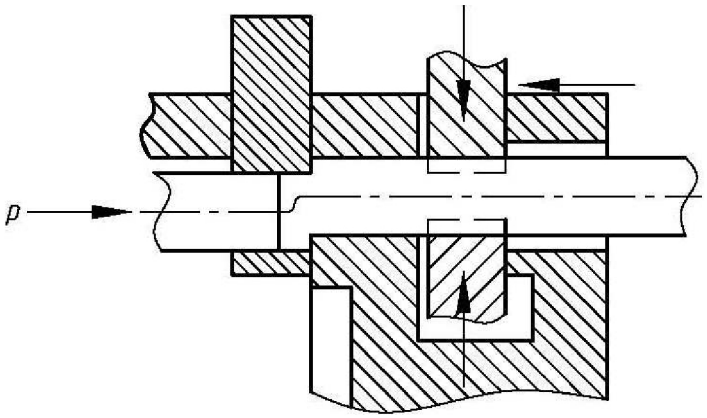


Рис. 116. Схема закрытой отрезки

Исследования, проведенные в МГТУ «Станкин» [46], показали, что для отрезки геометрически точных заготовок удельная сила p осевого сжатия должна составлять $(2 - 5)\sigma_T$ разрезаемого материала. Величина допустимой осевой силы лимитируется только силой поперечного зажима, удерживающего пруток от смещения.

При создании силы осевого сжатия прутка появляется возможность исключить влияние неточности поперечных сечений проката на точность отрезаемых заготовок путем редуцирования разрезаемого прутка непосредственно

в отрезном штампе [39]. Этот технологический прием применен в штампе, приведенном на рис. 117.

Разработаны несколько конструкций устройств для закрытой отрезки. Некоторые из них по сложности соизмеримы с конструкцией пресса. Наиболее рациональная конструкция такого устройства приведена на рис. 117.

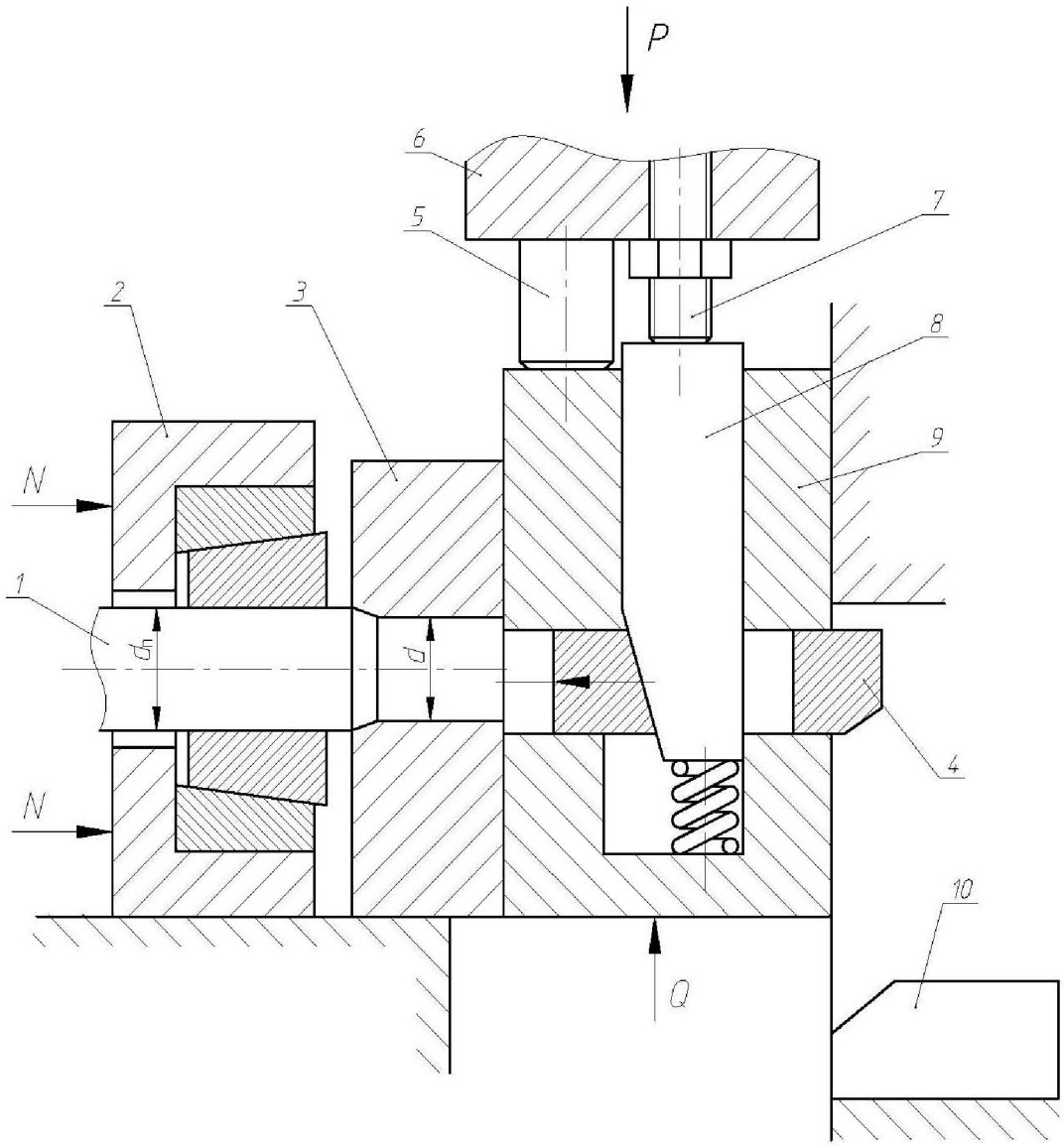


Рис. 117. Устройство для закрытой резки заготовки

Пруток *1* цанговым подающим устройством *2* вводится в отверстие неподвижного ножа *3*, имеющего заходный конус, и продвигается на величину подачи. При продвижении через коническую поверхность в ноже *3* пруток *1* подвергается редуцированию с целью калибровки по диаметру со значения $d_п$ до d. При движении вниз ползуна *6* регулируемый упор *7* перемещает клин *8*, который через клиновую ползушку *4* сжимает отрезаемую часть прутка в замкнутой полости ножей. Необходимая величина осевой силы достигается

регулировкой упора *7* относительно бойка *5*. При дальнейшем движении ползуна пресса боек *5* перемещает подвижный нож *9* вниз и происходит отрезка заготовки в условиях всестороннего сжатия металла в зоне реза.

Удаление отрезанной заготовки происходит перемещением ползушки *4* от клина *10*. При обратном ходе ползуна пресса подвижный нож возвращается в исходное положение силой *Q* буферного устройства.

Наиболее перспективным направлением коренного улучшения отрезки точных заготовок от стальных прутков в штампах является создание и внедрение в производство машин и износостойких штампов для закрытой отрезки с повышенной скоростью (> 2 м / с). При этом необходимо решить проблему уменьшения сильного звукового эффекта при скоростной отрезке, ухудшающего условия труда в заготовительном производстве.

Задача обеспечения более высокой конкурентоспособности закрытой отрезки коротких заготовок от прутка по сравнению с вырубкой из листового полуфабриката решается путем создания высокопроизводительных штампов для отрезки сразу нескольких заготовок за один ход ползуна пресса. Эта задача может быть решена применением многоопорной отрезки.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМИРУЮЩИХ СИЛ И НАКОПЛЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ОПЕРАЦИЯХ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЗАГОТОВОК С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗРАБОТАННЫХ ПРЕССОВ

Среди методов, применяемых для получения объемных нанокристаллических материалов, используется интенсивная пластическая деформация [3, 25]. Существует много работ, связанных с описанием схем, реализующих интенсивную пластическую деформацию, но каждая схема, имея свои плюсы, обладает и рядом существенных отрицательных сторон. Авторы работы [3] приводят метод «осадка-экструзия-осадка», известный в иностранной литературе как термин «Cyclic Extrusion Compression (CEC)». Однако приведенная в работе схема метода «осадка-экструзия-осадка» является сложной в плане создания для ее практического применения специализированного прессового оборудования. Значительно технологичнее наша отечественная схема, достаточно апробированная среди обработчиков давлением и опубликованная в работе [35].

Согласно работе [3] методы интенсивной пластической деформации позволяют достигать степеней деформации e = 10…100. При этом для разных схем деформирования в указанной работе показано, какими становятся микроструктуры заготовки. К сожалению, в этой работе не приведена связь структуры с достигаемыми степенями деформации.

В данной главе теоретически установлены величины накопленных деформаций в заготовке, подвергаемой обработке по схеме, технологичной и хорошо реализуемой в конструкциях прессового оборудования. Эта схема была приведена на рис. 51 для изготовления порошковых полуфабрикатов, имеющих высокую плотность (свыше 95 % от теоретической плотности железа).

Первый этап деформирования (рис. 51, *а*) заключался в формовании брикета с одновременным его радиальным выдавливанием при перемещении из верхней цилиндрической полости матрицы диаметром 32 мм в нижнюю цилиндрическую полость диаметром 36 мм, второй – те же операции, что и первый, а затем прямое выдавливание брикета с диаметра 36 до 32 мм (рис. 51,*б*).

При реализации уплотнения порошковой заготовки таким образом, как показано на рис. 51, возможна и другая последовательность операций: когда вначале производят прямое выдавливание заготовки, а на следующем этапе – ее радиальное выдавливание. Кроме того, возможно неоднократное последовательное повторение операций прямого и радиального выдавливаний при сохранении осевого сжатия. Это приводит к высокому уплотнению порошкового материала, а также к значительному измельчению зерен.

Понятно, что измельчение зерен связано с величиной достигаемых деформаций в заготовке.

Рассмотрим начальный этап уплотнения засыпанной в матрицу порошковой шихты. При этом перемещение матрицы, согласно схеме на рис. 51, не производится, а заготовка только сжимается в вертикальном направлении благодаря сближению пуансонов (рис. 51) [12, 20].

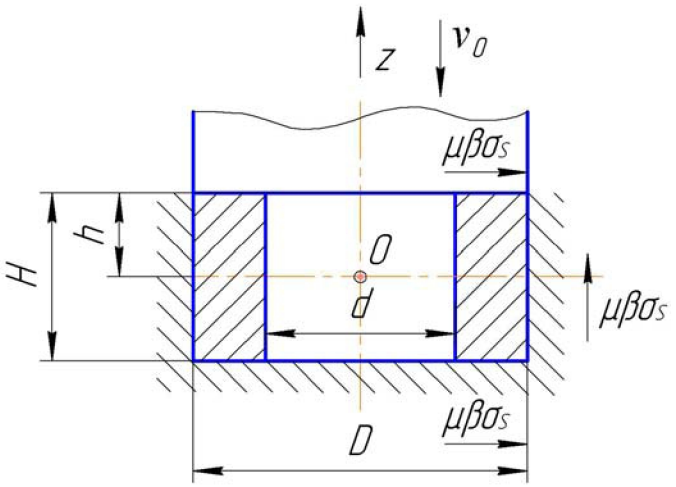


Рис. 118. Осадка полой заготовки в матрице

Чтобы учесть пористость на ранних стадиях уплотнения, авторы обратились к использовавшемуся ранее понятию представительского объема. Напомним, что понятие представительского объема использовали разные ученые. Их модели представительского объема приведены на рис. 119 [44, 45, 55, 56, 58].

Названные ученые применяли понятие представительского объема для определения параметров в предложенных ими выражениях критериев пластичности. В данном учебном пособии уплотнение описывается с применением традиционного критерия пластичности Губера-Мизеса-Генки для несжимаемого тела, а сжимаемость заготовки на начальном этапе ее уплотнения моделируется наличием в заготовке полости, объем которой непрерывно уменьшается по мере деформирования.

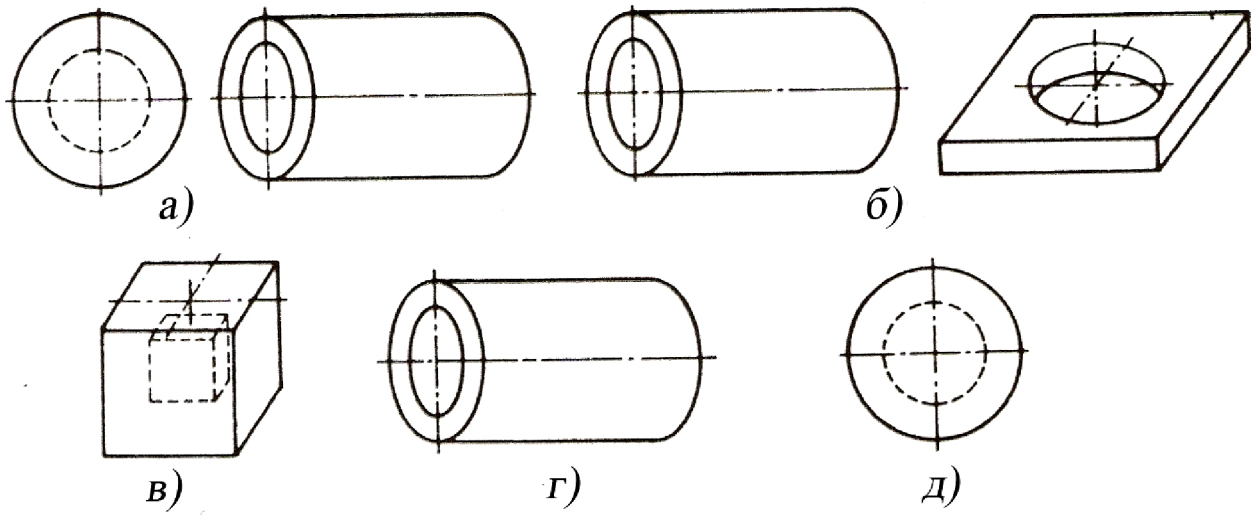


Рис. 119. Модели представительного объема пористого материала:
а - автор Р. Грин; *б* - автор И.Г. Кременский; *в* - авторы М. Ояне, С. Шима, Ю. Конно; *г* - автор - М. Хиршфогель; *д* - автор Х. Хенес

Для использования критерия пластичности Губера-Мизеса-Генки требуется определить, какую величину подставлять в правую часть уравнения:

$$(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_1-\sigma_3)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+6\left(\tau_{12}^2+\tau_{13}^2+\tau_{23}^2\right)=2\varphi^2\sigma_s^2. \qquad (2)$$

С целью определения этой величины проведено следующее исследование.

5.1. Определение условного напряжения текучести порошковой заготовки

Для порошковой заготовки понятие напряжения текучести не применялось. В условиях пластичности пористых тел [44, 45, 55, 56, 58] использовали напряжение текучести материала основы (рис. 120).

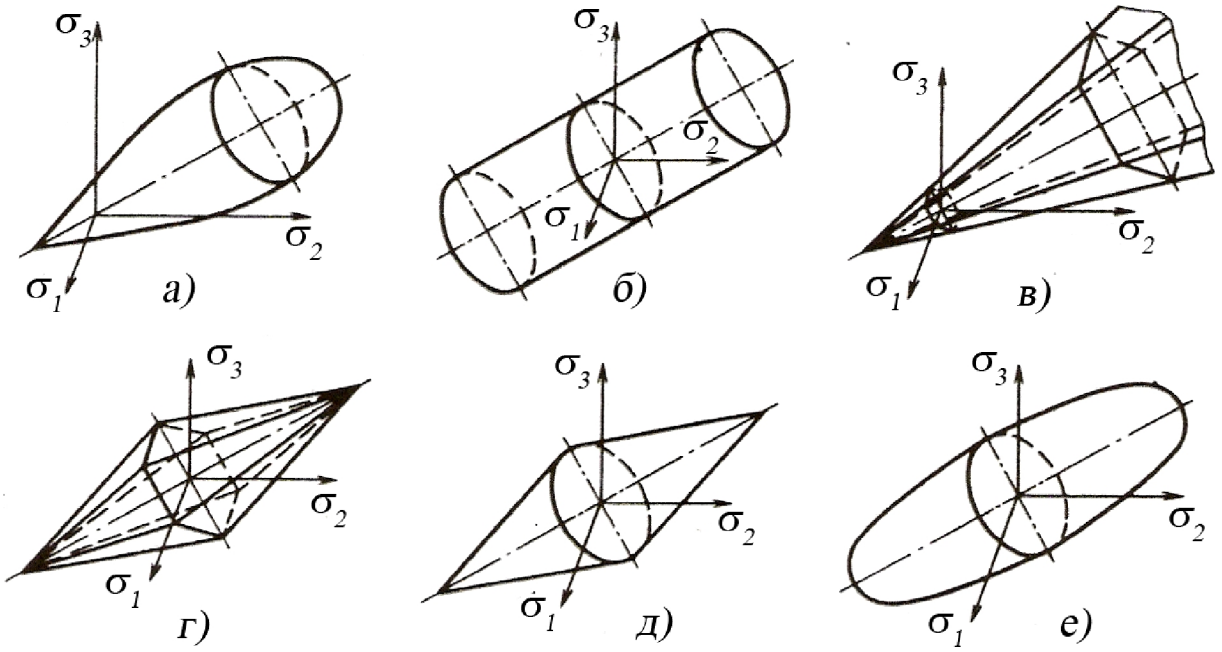


Рис. 120. Поверхности пластичности, соответствующие критериям пластичности пористых материалов: Н.П.Саха (*а*); И.С. Дегтярева и В.Л. Колмогорова (*б*); В.Е. Перельмана (*в*); Т. Табата, С. Масаки и Ю. Абе (*г, д*); Г.Куна и Ч. Дауна (*е*)

В то же время для возможности применения математических выражений, полученных для анализа деформирования сплошных заготовок, к анализу деформирования высокоплотных порошковых заготовок, а также для решения конкретной задачи, поставленной выше, 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.

Критерий пластичности материала Губера–Мизеса-Генки записан в цилиндрических координатах в виде

$$(1/2)\left[\left(\sigma_\rho-\sigma_\theta\right)^2+\left(\sigma_\theta-\sigma_z\right)^2+\left(\sigma_z-\sigma_\rho\right)^2+6\left(\tau_{\rho\theta}^2+\tau_{\theta z}^2+\tau_{\rho z}^2\right)\right]=\left(\varphi\sigma_{s0}\right)^2. \quad (3)$$

Входящую в правую часть равенства (3) величину $\varphi\sigma_{s0}$, на месте которой в теории пластичности беспористого материала стоит напряжение текучести σ_s, назовем условным напряжением текучести порошковой заготовки [13].

Для определения условного напряжения текучести неспеченной порошковой заготовки предлагается следующая методика.

Выполним серию экспериментов по холодному формованию в закрытой матрице брикетов с отношением высоты к диаметру меньше 0,25 из исследуемой порошковой шихты. На основании проведенных опытов построим зависимость между удельной силой формования и средней плотностью полученного брикета. Кроме того, выведем теоретическую зависимость между удельной силой формования и средней плотностью при уплотнении порошка в закрытой матрице с учетом сил трения по контактной поверхности. Для этого решим 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, находим зависимость напряжения текучести неспеченной порошковой заготовки от плотности.

Условие пластичности (3) при формовании цилиндрических образцов запишем в виде

$$\sigma_\rho^2-\sigma_\rho\sigma_z+\sigma_z^2+3\tau_{\rho z}^2=\varphi^2\sigma_{s0}^2\ , \quad (4)$$

где σ_ρ, σ_z – нормальные напряжения, $\tau_{\rho z}$ – касательное напряжение, σ_{s0} – напряжение текучести твердой фазы пористого материала, $\varphi=\varphi(\Pi,\sigma_0)$ – функция пористости и среднего нормального напряжения.

Уравнения связи между деформациями и напряжениями имеют вид

$$\left.\begin{aligned} d\xi_\rho &= d\lambda[3(\sigma_\rho-\sigma_0)-(2/3)\sigma_{s0}^2\varphi(\partial\varphi/\partial\sigma_0)];\\ d\xi_z &= d\lambda[3(\sigma_z-\sigma_0)-(2/3)\sigma_{s0}^2\varphi(\partial\varphi/\partial\sigma_0)];\\ d\gamma_{\rho z} &= 3d\lambda\tau_{\rho z}, \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

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 цилиндры формочками меньшего диаметра.

Каждый из образованных таким образом объемов засыпали попеременно порошком меди и железным порошком. Затем проводили уплотнение многослойного образца. После уплотнения брикет разрезали по меридиональной плоскости. На разрезах видно, что диаметры соответствующих слоев в процессе уплотнения не изменяются (рис. 121).

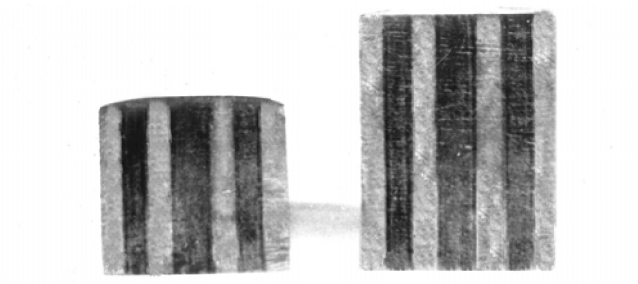


Рис. 121. Уплотнение многослойной порошковой заготовки при формовании в закрытой матрице: справа – начало уплотнения, слева – окончание

Поскольку деформация ξ_θ также равна 0, то из (5) следует, что $\sigma_\rho = \sigma_\theta$. Поэтому выражение для среднего нормального напряжения можно преобразовать к виду

$$\sigma_0 = (2\sigma_\rho + \sigma_z)/3 = \sigma_\rho(2 + \sigma_z/\sigma_\rho)/3. \qquad (6)$$

Обозначим отношение σ_ρ / σ_z как α – коэффициент бокового давления. Тогда $\sigma_0 = \sigma_\rho(2+1/\alpha)/3 = \sigma_\rho(1+2\alpha)/(3\alpha)$.

Из (4) получим

$$3\sigma_0(\alpha-1)/(1+2\alpha) = (2/3)\sigma_{s0}^2\varphi(\partial\varphi/\partial\sigma_0). \qquad (7)$$

Принимаем, что $\varphi = \varphi(\sigma_0)$, поскольку влияние среднего напряжения на величину коэффициента φ значительно больше, чем влияние плотности порошка. При этом допущении (7) преобразуется к виду

$$3\sigma_0(\alpha-1)/(1+2\alpha) = 2\sigma_{s0}^2\varphi(d\varphi/d\sigma_0)/3. \qquad (8)$$

Интегрируя (8) с учетом граничного условия: при $\sigma_0 = 0$ $\varphi = \varphi_0$, получаем

$$\varphi^2 = 9(\alpha-1)\sigma_0^2/[2(1+2\alpha)\sigma_{s0}^2] + \varphi_0^2. \qquad (9)$$

С учетом (9) запишем (4) так:

$$3\left(\sigma_\rho - \sigma_z\right)^2 \Big/ \left[2\left(1-\alpha\right)\right] + 3\tau_{\rho z}^2 = \sigma_i^2 = \sigma_s^2, \qquad (10)$$

где σ_s – условное напряжение текучести.

Схемы процесса формования в закрытой матрице приведены на рис. 118, 122.

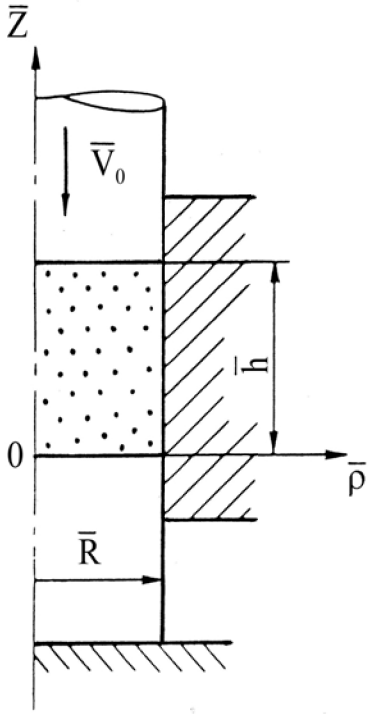


Рис. 122. Схема формования порошковой заготовки в закрытой матрице

Введены следующие обозначения относительных размеров: $\rho = \overline{\rho} / \overline{R}$, $z = \overline{z} / \overline{R}$, $h = \overline{h} / \overline{R}$, $\overline{\rho}$, $\overline{R}$, $\overline{z}$, $\overline{h}$.

Уравнения равновесия имеют вид

$$\left.\begin{aligned} &\partial\sigma_\rho / \partial\rho + \partial\tau_{\rho z} / \partial z = 0, \\ &\partial\tau_{\rho z} / \partial\rho + \tau_{\rho z} / \rho + \partial\sigma_z / \partial z = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

Из условия пластичности (10), пренебрегая касательными напряжениями, получим

$$\partial\sigma_\rho / \partial z = \partial\sigma_z / \partial z . \qquad (12)$$

В уравнениях равновесия принимаем, что $\tau_{\rho z} = \varphi(z) x f(\rho)$. С учетом (12) получим

$$\left.\begin{aligned} &\partial\sigma_\rho / \partial\rho = -\varphi(z) f(\rho), \\ &\partial\sigma_\rho / \partial z = -\varphi(z)[f'(\rho) + f(\rho)/\rho]. \end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

После дифференцирования первого уравнения (13) по z, а второго по ρ получим две равные между собой функции разных переменных, которые обозначим β:

$$\left.\begin{aligned} &\beta = \varphi''(z) / \varphi(z), \\ &\beta = [f''(\rho) + f'(\rho)/\rho - f(\rho)/\rho^2] / f(\rho). \end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

Решая первое уравнение системы (14), получим

$$\varphi(z) = C_1 e^{\sqrt{\beta}z} + C_2 e^{-\sqrt{\beta}z},$$

поскольку при $z = 0$ $\tau_{\rho z} = 0$, $C_1 = -C_2$.

Второе уравнение системы (14) преобразуется к виду

$$\rho^2 f''(\rho) + \rho f'(\rho) - (\beta\rho^2 + 1) f(\rho) = 0.$$

Решение этого уравнения, согласно справочнику Э. Камке,

$$f(\rho) = C_3 I_1(\sqrt{\beta}\rho) + C_4 K_1(\sqrt{\beta}\rho), \qquad (15)$$

где I_1, K_1 - функции Бесселя 1-го и 2-го родов чисто мнимого аргумента. Согласно справочнику при $\rho = 0$, $I_1 = 0$, $K_1 = \infty$. Кроме того, при $\rho = 0$ $\tau_{\rho z} = 0$. Это условие может быть обеспечено, если $f(\rho) = 0$. Для этого необходимо, чтобы $C_4 = 0$.

После определения произвольных постоянных C_2 и C_4 и упрощения выражений для $f(\rho)$ и $\varphi(z)$ получим

$$\tau_{\rho z} = C_1 (e^{\sqrt{\beta}z} - e^{-\sqrt{\beta}z}) C_3 I_1(\sqrt{\beta}\rho), \qquad (16)$$

где $I_1(\sqrt{\beta}\rho) = \sum_{k=0}^{\infty} (\sqrt{\beta}\rho / 2)^{2k+1} / [(k+1)!k!]$.

Ограничиваясь двумя первыми членами ряда (16), имеем

$$\tau_{\rho z} = C_5 \sqrt{\beta} (e^{\sqrt{\beta}z} - e^{-\sqrt{\beta}z})(\rho / 2 + \beta\rho^3 / 16). \qquad (17)$$

Принимаем, что контактные касательные напряжения по боковой поверхности распределяются пропорционально нормальным напряжениям, т.е. $\tau_{\rho z} = \mu\sigma_\rho$. Подставляя (16) в (12) и интегрируя, при $z = h$ получаем

$$\sigma_{z|_{z=h}} = -C_5 \beta (e^{\sqrt{\beta}h} + e^{-\sqrt{\beta}h})(\rho^2 / 4 + \beta\rho^4 / 64) + C_6. \qquad (18)$$

Аналогично при

$$\sigma_{\rho|_{\rho=h}} = -C_5 \beta (e^{\sqrt{\beta}z} + e^{-\sqrt{\beta}z})(1 + \beta / 4) + C_7. \qquad (19)$$

Постоянные интегрирования найдем, используя условие пластичности (10) в виде:

при $\rho = 0$, $z = h$, $\tau_{\rho z} = 0$

$$\sigma_z = -\sqrt{2 / [3(1-\alpha)]}\,\sigma_s \qquad (20)$$

при $\rho = 1$, $z = 0$, $\tau_{\rho z} = 0$

$$\sigma_\rho = -\sqrt{2\alpha^2 / [3(1-\alpha)]}\sigma_s .$$

Подставим (20) в (18) и (19), откуда

$$C_6 = -\sqrt{2 / [3(1-\alpha)]}\sigma_s ,$$

$$C_7 = -\sqrt{2\alpha^2 / [3(1-\alpha)]}\sigma_{s0} + 2C_5(1 + \beta / 4) .$$

Определим β из условия, при $\rho = 1$, $z = h$, $\sigma_\rho = \alpha\sigma_z$. Получим

$$ch(\sqrt{\beta}h)(a + \beta b) = 4 + \beta ,$$

где $a = 4 - \alpha$; $b = 1 - \alpha / 16$.

Разложим $ch(\sqrt{\beta}b)$ в ряд Маклорена. Ограничившись первыми 2 членами, получим $(1 + \beta h^2 / 2)(a + b\beta) = 4 + \beta$.

Из последнего равенства

$$\beta = [-(b + ah^2 / 2 - 1) + \sqrt{(b + ah^2 / 2 - 1)^2 + 4(4 - a)bh^2 / 2}\ ] / (bh^2) .$$

Постоянную C_5 определим из условия: при $\rho = 1$, $z = h$, $\tau_{\rho z} = \mu\sigma_\rho$:

$$C_5 = 8\mu\sigma_{s0}\sqrt{2\alpha^2 / [3(1-\alpha)]} / [\sqrt{\beta}(8 + \beta)sh(\sqrt{\beta}h) - 4\mu(4 + \beta)(ch\sqrt{\beta}h - 1)] . \quad (21)$$

После определения всех постоянных интегрирования из (18) выводим формулу для определения удельной силы формования

$$q = \left\{ \frac{\mu\alpha\beta(24 + \beta)ch(\sqrt{\beta}h)}{12[\sqrt{\beta}(8 + \beta)sh(\sqrt{\beta}h) - 4\mu(4 + \beta)(ch\sqrt{\beta}h - 1)]} + 1 \right\} \times \sqrt{2 / [3(1-\alpha)]}\sigma_s . \quad (22)$$

На рис. 123 приведены зависимости, полученные в соответствии с описанной выше методикой. 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 [38].

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 ($D/h \geq 2$). 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. 123, можно аппроксимировать формулой

$$\sigma_s = c\gamma^d,$$

где σ_s измеряется в МПа, γ – средняя плотность заготовки в кг/м^3.

Коэффициенты имеют значения: для ПЖВ2.160.28 $c = 70{,}7 \times 10^{-12}$, $d = 3{,}34$; для ПЖВ4.160.28 $c = 102{,}8 \times 10^{-12}$, $d = 3{,}36$.

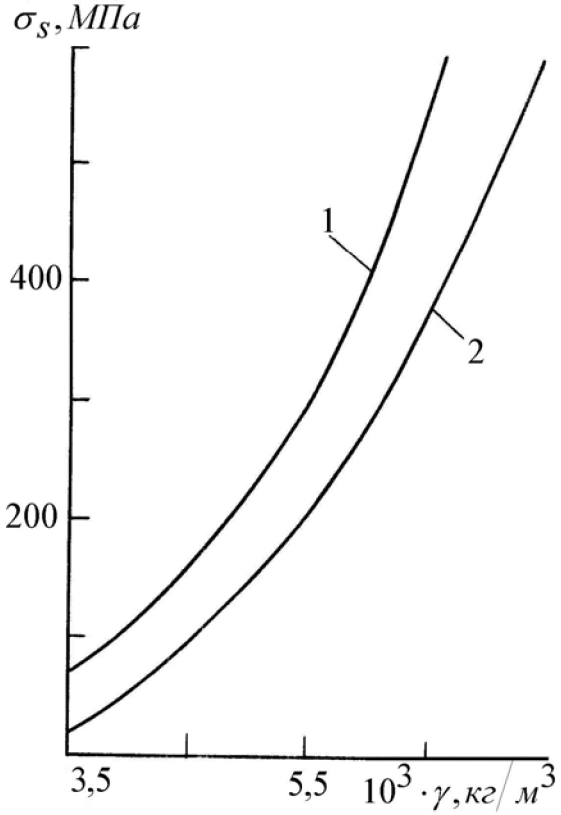


Рис. 123. Зависимости условного напряжения текучести от плотности заготовки:
1 – порошок ПЖВ4.160.28; *2* – порошок ПЖВ2.160.28

Таким образом, предлагаемая методика позволяет определить условное напряжение текучести с учетом реальных свойств пористого материала.

5.2. Исследование величин напряжений при уплотнении порошковой заготовки в закрытой матрице

Рассмотрим кинематическое и напряженное состояния заготовки на этапе уплотнения, показанном на рис. 118 [12, 20].

Силы контактного трения определяем по закону Зибеля как

$$\tau_к = \mu\beta\sigma_s,$$

где μ – коэффициент трения по напряжению текучести; β – коэффициент Лоде.

Кинематически возможную осевую скорость представим в следующем общем виде:

$$\nu_z = f(z), \tag{23}$$

удовлетворяющем имеющимся граничным условиям: $\nu_z = -\nu_0$ при $z = h$ и $\nu_z = 0$ при $z = 0$.

Из условия несжимаемости

$$\xi_z + \xi_\rho + \xi_\theta = 0\ , \tag{24}$$

которое для осесимметричной задачи имеет вид

$$\frac{\partial \nu_z}{\partial z} + \frac{\partial \nu_\rho}{\partial \rho} + \frac{\nu_\rho}{\rho} = 0 \tag{25}$$

или

$$\frac{1}{\rho}\left[\frac{\partial}{\partial \rho}(v_\rho \rho)\right] = -\frac{\partial v_z}{\partial z}\ , \tag{26}$$

можно найти, что радиальная скорость

$$v_\rho = \frac{\partial f(z)}{\partial z}\cdot\frac{\rho}{2} + \frac{f_1(z)}{\rho}\ . \tag{27}$$

Из граничного условия $\nu_\rho = 0$ при $\rho = D/2$ вытекает, что

$$f_1(z) = -\frac{\partial f(z)}{\partial z}\cdot\frac{D^2}{8} \tag{28}$$

и, следовательно,

$$v_\rho = \frac{1}{2}\frac{\partial f(z)}{\partial z}\left(\rho - \frac{D^2}{4\rho}\right)\ . \tag{29}$$

Учитывая формулы (23) и (29), находим скорости деформаций:

$$\begin{cases} \xi_\rho = \dfrac{\partial v_\rho}{\partial \rho} = \dfrac{1}{2}\dfrac{\partial f(z)}{\partial z}\left(1 + \dfrac{D^2}{4\rho^2}\right), \\ \xi_\theta = \dfrac{v_\rho}{\rho} = \dfrac{1}{2}\dfrac{\partial f(z)}{\partial z}\left(1 - \dfrac{D^2}{4\rho^2}\right), \\ \xi_z = \dfrac{\partial v_z}{\partial z} = -\dfrac{\partial f(z)}{\partial z}\ , \\ \eta_{\rho z} = \dfrac{\partial v_\rho}{\partial z} + \dfrac{\partial v_z}{\partial \rho} = \dfrac{1}{2}\dfrac{\partial^2 f(z)}{\partial z^2}\left(\rho - \dfrac{D^2}{4\rho}\right). \end{cases} \tag{30}$$

Уравнения связи Леви–Мизеса имеют вид

$$\begin{cases} \sigma_\rho = \sigma + \dfrac{2}{3}\dfrac{\xi_\rho}{\xi_i}, \\ \sigma_\theta = \sigma + \dfrac{2}{3}\dfrac{\xi_\theta}{\xi_i}, \\ \sigma_z = \sigma + \dfrac{2}{3}\dfrac{\xi_z}{\xi_i}, \\ \tau_{\rho z} = \dfrac{1}{3}\dfrac{\eta_{\rho z}}{\xi_i}, \end{cases} \tag{31}$$

где $$\sigma = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta + \sigma_z}{3} \quad - \tag{32}$$

среднее напряжение (гидростатическое давление).

Усредним по радиусу ρ интенсивность скоростей деформации, после чего её можно записать в общем виде как $\xi_1 f(z)$. Тогда из систем (30) и (31) следует, что

$$\tau_{\rho z} = f_2(z)\left(\rho - \frac{D^2}{4\rho}\right). \tag{33}$$

Уравнения равновесия для данной задачи имеют вид

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \dfrac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} + \dfrac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0, \\ \dfrac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \dfrac{\partial \tau_{z\rho}}{\partial \rho} + \dfrac{\tau_{z\rho}}{\rho} = 0. \end{cases} \tag{34}$$

Подставив выражение (33) во второе уравнение системы (34), найдём, что

$$\sigma_z = -2 f_2(z) dz + f(\rho). \tag{35}$$

Так как $\rho \le D/2$, то из сравнения первого и третьего выражений системы (30) видно, что при осадке полой заготовки в матрице максимальной по абсолютной величине скоростью деформации является ξ_ρ. Тогда из систем (30) и (31) следует, что наибольшим по алгебраической величине нормальным напряжением будет σ_ρ, а наименьшим – либо σ_z, либо σ_θ.

Например, для заготовки с $d/D = 0{,}3$ радиус ρ изменяется в пределах $0{,}15D \le \rho \le 0{,}5D$. При $\rho = 0{,}29D$ $\xi_z = \xi_\theta$ и, соответственно, $\sigma_z = \sigma_\theta$. При $\rho > 0{,}29D$ σ_θ немного превышает σ_z, а при $\rho < 0{,}29D$, наоборот, σ_z не-

много превышает σ_θ. Таким образом, σ_z достаточно близко к σ_θ, что позволяет использовать следующие приближённые условия пластичности:

$$\sigma_\rho - \sigma_z = \beta\sigma_s, \tag{36}$$

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \beta\sigma_s. \tag{37}$$

$$\sigma_\theta - \sigma_z = \beta\sigma_s. \tag{38}$$

Подставив выражения (35), (37) и (38) в первое уравнение равновесия (33), получим уравнение

$$\frac{4\rho}{4\rho^2 - D^2}\left[\frac{\partial f(\rho)}{\partial\rho} + \frac{\beta\sigma_s}{\rho}\right] = -\frac{\partial f_2(z)}{\partial z}. \tag{39}$$

Так как левая часть этого уравнения зависит только от ρ, а правая – только от z, то обе эти части должны равняться постоянной величине C_5, откуда:

$$f(\rho) = -\beta\sigma_s \ln\rho + \frac{C_5}{2}\rho^2 - \frac{C_5 D^2}{4}\ln\rho + C_6, \tag{40}$$

$$f_2(z) = -C_5 z + C_7. \tag{41}$$

Подставив выражение (41) в формулу (33), найдём касательные напряжения:

$$\tau_{\rho z} = (C_7 - C_5 z)\left(\rho - \frac{D^2}{4\rho}\right). \tag{42}$$

Из граничных условий:

$\tau_{\rho z} = -\beta\sigma_s\mu_2$ при $\rho = d/2$, $z = 0$

и $\tau_{\rho z} = \beta\sigma_s\mu$ при $\rho = d/2$, $z = h$

следует, что произвольные постоянные в выражении касательного напряжения равны:

$$\begin{cases} C_5 = \dfrac{2\beta\sigma_s d(\mu + \mu_2)}{(D^2 - d^2)h}, \\ C_7 = \dfrac{2\beta\sigma_s\mu_2 d}{D^2 - d^2}. \end{cases} \tag{43}$$

Коэффициент μ_2 введён для получения общего решения, которое может быть затем конкретизировано для случаев $h < H$ и $h = H$ (рис. 118).

Подставляя формулы (40) и (41) в выражение (35), получаем:

$$\sigma_z = (C_5 z - 2C_7)z - \beta\sigma_s \ln\rho + \frac{C_5}{2}\rho^2 - \frac{C_5 D^2}{4}\ln\rho + C_6 . \qquad (44)$$

Подставляя формулу (44) в выражение (38) и используя граничное условие $\sigma_\rho = 0$ при $z = h$ и $\rho = d/2$, находим произвольную постоянную:

$$C_6 = -\beta\sigma_s - (C_5 h - 2C_7)h + \beta\sigma_s \ln\frac{d}{2} - \frac{C_5 d^2}{8} + \frac{C_5 D^2}{4}\ln\frac{d}{2}.$$

Тогда окончательно

$$\sigma_z = -\beta\sigma_s - (C_5 h - 2C_7)h + (C_5 z - 2C_7)z - \\ -\beta\sigma_s \ln\frac{2\rho}{d} - \frac{C_5}{4}\left(\frac{d^2}{2} - 2\rho^2 + D^2 \ln\frac{2\rho}{d}\right). \qquad (45)$$

Подставив в выражение (45) $z = h$, получим формулу нормальных напряжений на поверхности контакта с верхним инструментом:

$$\sigma_z = -\beta\sigma_s - \beta\sigma_s \ln\frac{2\rho}{d} - \frac{C_5}{4}\left(\frac{d^2}{2} - 2\rho^2 + D^2 \ln\frac{2\rho}{d}\right). \qquad (46)$$

Полная сила осадки в матрице складывается из силы, необходимой для пластической деформации заготовки и определяемой напряжением (46), и силы, необходимой для преодоления трения о матрицу при перемещении вниз очага пластической деформации. С учётом этого и равенств (43), относительная удельная сила осадки полой заготовки в матрице будет равна:

$$q = \frac{1}{\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}}\left(2\pi\int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} |\sigma_z|\rho d\rho + \pi D h \beta\sigma_s \mu\right) = \beta\sigma_s \left\{\frac{1}{2} + \frac{D^2}{D^2 - d^2}\ln\frac{D}{d} + \right.$$

$$\left. + \frac{(\mu + \mu_2)d}{8h(D^2 - d^2)^2}\left[(d^2 - 3D^2)(D^2 - d^2) + 4D^4 \ln\frac{D}{d}\right] + \frac{4\mu D h}{D^2 - d^2}\right\}. \qquad (47)$$

Расчётное давление на стенку матрицы найдём при $\rho = d/2$, поставив в формулу (38) выражение (46) с учётом равенств (43):

$$p = |\sigma_\rho| = \beta\sigma_s \left[\ln\frac{D}{d} + \frac{(\mu + \mu_2)d}{4h(D^2 - d^2)}\left(d^2 - D^2 + 2D^2 \ln\frac{D}{d}\right)\right]. \qquad (48)$$

Так как согласно второму выражению системы (30) при $\rho = d/2$ $\xi_\theta = 0$, то деформированное состояние на поверхности контакта заготовки с матрицей

является плоским, и, следовательно, здесь $\beta=1{,}155$. С учётом этого в расчётах можно принимать среднее значение $\beta=1{,}1$.

Если $h<H$, то вследствие разрыва касательных составляющих скоростей на границе между пластической и жёсткой зонами следует принять $\mu_2=0{,}5$ (см. рис. 118). Тогда из формулы (47) получим, что удельная сила осадки с локальным очагом пластической деформации определяется выражением

$$q=\beta\sigma_s\left\{\frac{1}{2}+\frac{D^2}{D^2-d^2}\ln\frac{D}{d}+\frac{4\mu Dh}{D^2-d^2}+\right.$$

$$\left.+\frac{(\mu+0{,}5)d}{8h(D^2-d^2)^2}\left[(d^2-3D^2)(D^2-d^2)+4D^4\ln\frac{D}{d}\right]\right\}. \qquad (49)$$

Из условия минимума данного выражения найдём высоту очага пластической деформации:

$$h=\sqrt{\frac{(\mu+0{,}5)d}{32\mu D}\left[d^2-3D^2+\frac{4D^4}{D^2-d^2}\ln\frac{D}{d}\right]}. \qquad (50)$$

Для удобства перепишем выражения (49) и (50) в следующем виде:

$$\frac{h}{D}=\sqrt{\frac{\mu+0{,}5}{32\mu}(d/D)\left[(d/D)^2-3-\frac{4}{1-(d/D)^2}\ln(d/D)\right]}; \qquad (51)$$

$$q=\beta\sigma_s\left\{\frac{1}{2}-\frac{1}{1-(d/D)^2}\ln(d/D)+\frac{4\mu(h/D)}{1-(d/D)^2}+\right.$$

$$\left.+\frac{(\mu+0{,}5)(d/D)}{8(h/D)[1-(d/D)^2]^2}\left\{[(d/D)^2-3][1-(d/D)^2]-4\ln(d/D)\right\}\right\}. \qquad (52)$$

Выведенные зависимости применяются для расчета силы уплотнения засыпанной в матрицу порции порошка до начала обработки заготовки перемещением ее из участка полости матрицы одного диаметра в участок другого диаметра. При последующей обработке заготовки указанным способом с целью измельчения зерна рассчитанная с применением формулы (52) сила сохраняется приложенной к торцам заготовки.

Натуральное значение силы осадки полой заготовки в матрице определено выражением

$$P=\frac{\pi}{4}\left(D^2-d^2\right)q, \qquad (53)$$

в которое входит текущий внутренний диаметр d. В формулу (53) надо подставлять значение d, соответствующее окончанию осадки.

5.3. Исследование величин накопленных деформаций при измельчении зерен порошковых заготовок осевым сжатием с одновременным прямым выдавливанием

Исследуем кинематику течения частиц при перемещении заготовки из участка полости большего диаметра в участок меньшего диаметра [14, 19] (рис. 51, *б*). Расчетная схема операции приведена на рис. 124.

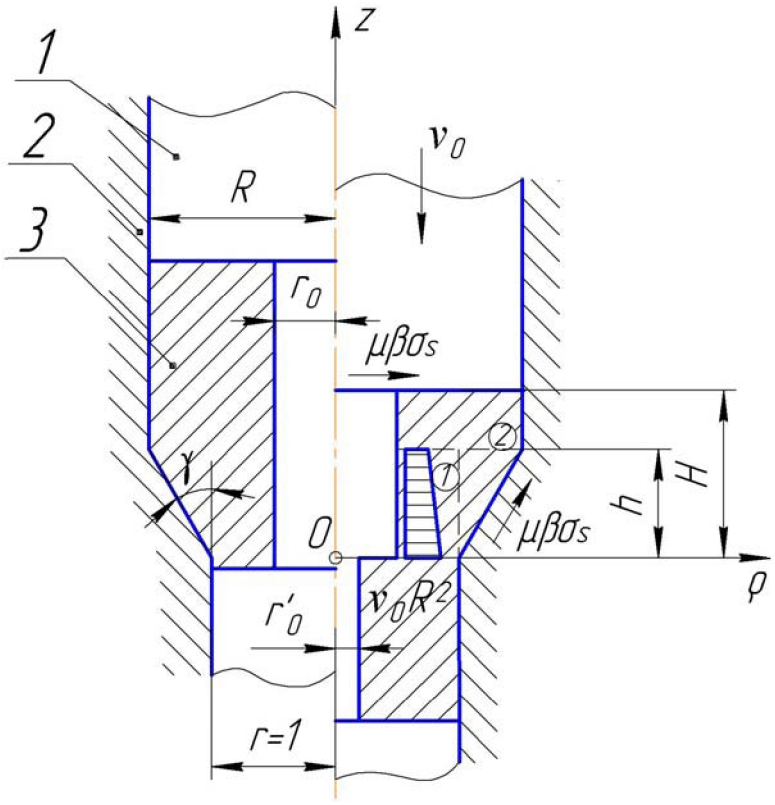


Рис. 124. Расчетная схема операции осевого сжатия с одновременным выдавливанием: *1* – пуансон; *2* – матрица; *3* – заготовка

Рассмотрим область 1.

Кинематически возможную скорость течения вдоль оси z зададим в виде

$$\nu_{z1} = \nu_0\left(\Psi\frac{z}{h} - 1 - \Psi\right), \tag{54}$$

где Ψ – коэффициент обжатия:

$$\Psi = \frac{R^2 - 1}{1 - r_0^2}. \tag{55}$$

Заданное выражение отвечает граничным условиям:

при $z = h$ $\quad \nu_{z1} = \nu_0$, $\quad$ при $z = 0$ $\quad v_{z1} = v_0 R^2$.

Подставим выражение (54) в выражение

$$\frac{\partial \nu_z}{\partial z} + \frac{\partial \nu_\rho}{\partial \rho} + \frac{\nu_\rho}{\rho} = 0. \tag{56}$$

Методически это выглядит так, что мы при расчете кинематики течения не учитываем изменения диаметра осевого отверстия в процессе выполнения каждого из этапов уплотнения. Это изменение определяется при поэтапном экспериментировании и измерении полученной плотности заготовки. В дальнейших расчетах на каждом этапе вводятся экспериментальные данные о плотности и связанном с этим диаметром осевого отверстия.

Накопление деформаций частицами в процессе пластического деформирования мы рассчитаем по выведенным ниже формулам:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \nu_{z1}}{\partial z} = \frac{\nu_0}{h}\Psi, \\
&\frac{\partial}{\partial \rho}\left(\nu_{\rho 1}\rho\right) = -\nu_0 \frac{\Psi}{h}\rho, \\
&\nu_{\rho 1}\rho = -\nu_0 \frac{\Psi}{2h}\rho^2 + f\left(z\right), \\
&\nu_{\rho 1} = -\nu_0 \frac{\Psi}{2h}\rho + \frac{f\left(z\right)}{\rho}.
\end{aligned} \tag{57}$$

Из граничного условия $\nu_{\rho 1} = 1$ при $\rho = r_0$ следует, что произвольная функция равна:

$$f_1\left(z\right) = \nu_0 \frac{\Psi}{2h} {r_0}^2.$$

С учетом этого радиальная скорость будет равна:

$$\nu_{\rho 1} = \nu_0 \frac{\Psi}{2h}\left(\frac{{r_0}^2}{\rho} - \rho\right). \tag{58}$$

В разработанном с участием авторов методе [5] после определения кинематически возможного поля скоростей течения

$$\begin{aligned}
&v_x = v_x\left(x, y, z, t\right); \\
&v_y = v_y\left(x, y, z, t\right); \\
&v_z = v_z\left(x, y, z, t\right)
\end{aligned} \tag{59}$$

следует проинтегрировать выражения:

$$\begin{aligned}
&v_x\left(x, y, z, t\right) = \frac{\partial x}{\partial t}; \\
&v_y\left(x, y, z, t\right) = \frac{\partial y}{\partial t}; \\
&v_z\left(x, y, z, t\right) = \frac{\partial z}{\partial t}.
\end{aligned} \tag{60}$$

В результате чего с учетом начальных условий $x = x_0$, $y = y_0$, $z = z_0$ при $t = 0$ найдем зависимость текущих координат материальной точки (координата Эйлера) от исходных координат (координата Лагранжа) и времени:

$$x = f_1(x_0, y_0, z_0, t);$$

$$y = f_2(x_0, y_0, z_0, t); \qquad (61)$$

$$z = f_3(x_0, y_0, z_0, t).$$

С учетом выражений (54) и (60) напишем дифференциальное уравнение:

$$\frac{dz}{dt} = v_0\left(1 - \Psi - \Psi\frac{z}{h}\right),$$

которое приводится к виду

$$\int \frac{dz}{1 - \Psi - \Psi\frac{z}{h}} = \int v_0 dt.$$

Тогда $\frac{h}{\Psi}\ln\left[C_1\left(1 - \Psi - \Psi\frac{z}{h}\right)\right] = v_0 t = s_1.$

Потенцируя это выражение и вводя обозначение

$$n_1 = \frac{s_1}{h}, \qquad (62)$$

получим

$$C_1\left(1 - \Psi - \Psi\frac{z}{h}\right) = e^{\Psi n_1}. \qquad (63)$$

Произвольную постоянную C_1 находим из начального условия $z = z_1$ при $n_1 = 0$ (последнее соответствует эквивалентным условиям $t_1 = 0$ или $s_1 = 0$):

$$C_1 = \frac{1}{1 - \Psi - \Psi\frac{z_1}{h}}. \qquad (64)$$

Преобразовав выражение (63) с учетом равенства (64), окончательно получим

$$z = \frac{h}{\Psi}\left[1 + \Psi + \left(\Psi\frac{z_0}{h} - 1 - \Psi\right)e^{\Psi n_1}\right]. \qquad (65)$$

Далее с учетом выражения (60) напишем дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\rho}{dt} = v_0\frac{\Psi}{2h}\left(\frac{r_0^2}{\rho} - \rho\right),$$

которое приведем к виду

$$\int \frac{2\rho d\rho}{r_0^2 - \rho^2} = \Psi\frac{v_0}{h}\int dt.$$

Тогда

$$\ln C_2\left(r_0^2-\rho^2\right)=\Psi\frac{v_0}{h}t=s_1\frac{\Psi}{h}.$$

С учетом (62)

$$\ln C_2\left(r_0^2-\rho^2\right)=-\Psi n_1.$$

Потенцируя это выражение, получим

$$C_2=\left(r_0^2-\rho^2\right)=e^{-\Psi n_1}. \tag{66}$$

Произвольную постоянную находим из начального условия $\rho=\rho_1$ при $n_1=0$:

$$C_2=\frac{1}{r_0^2-\rho_1^2}. \tag{67}$$

Преобразовав выражение (66) с учетом равенства (67), окончательно получим

$$\rho=\sqrt{r_0^2+\left(r_0^2-\rho_1^2\right)\ e^{-\Psi n_1}}. \tag{68}$$

Начальные координаты (координаты Лагранжа) частицы: при $t=0$, $z=z_0$, $\rho=\rho_0$.

Тогда

$$\begin{cases} z=\dfrac{h}{\Psi}\left[1+\Psi+\left(\Psi\dfrac{z_0}{h}-1--\Psi\right)e^{\Psi n}\right], \\ \rho=\sqrt{r_0^2+\left(\rho_0^2-r_0^2\right)\ e^{-\Psi n}}, \end{cases} \tag{69}$$

где $n=\dfrac{s}{h}$, $s=v_0t$ – рабочий ход пуансона; e – основание натурального логарифма.

С учетом выражений (54) и (58) скорости деформаций будут равны:

$$\begin{cases} \xi_\rho=\dfrac{\partial v_\rho}{\partial\rho}=-v_0\dfrac{\Psi}{2h}\left(1+\dfrac{r_0^2}{\rho^2}\right), \\ \xi_\theta=\dfrac{v_\rho}{\rho}=-v_0\dfrac{\Psi}{2h}\left(1-\dfrac{r_0^2}{\rho^2}\right), \\ \xi_z=\dfrac{\partial v_z}{\partial z}=v_0\dfrac{\Psi}{h}, \end{cases} \tag{70}$$

а интенсивность скоростей деформаций

$$\xi_{i1} = \beta\left|\xi_{max}\right| = 1{,}1\nu_0\frac{\Psi}{h}. \tag{71}$$

С другой стороны, в условиях осевой симметрии скорости деформаций выражаются через компоненты тензора накопленных деформаций:

$$\begin{cases} \xi_z = \dfrac{\partial e_z}{\partial t} + v_\rho\dfrac{\partial e_z}{\partial \rho} + v_z\dfrac{\partial e_z}{\partial z}, \\ \xi_\rho = \dfrac{\partial e_\rho}{\partial t} + v_\rho\dfrac{\partial e_\rho}{\partial \rho} + v_z\dfrac{\partial e_\rho}{\partial z}, \\ \xi_\theta = \dfrac{\partial e_\theta}{\partial t} + v_\rho\dfrac{\partial e_\theta}{\partial \rho} + v_z\dfrac{\partial e_\theta}{\partial z}. \end{cases} \tag{72}$$

Полагая, что в области 1 деформации $e_z = e_z(z)$, $e_\theta = e_\theta(\rho)$, $e_\rho = e_\rho(\rho, z)$, приводим систему (72) к виду:

$$\begin{cases} \xi_z = v_z\dfrac{\partial e_z}{\partial z}, \\ \xi_\theta = v_\rho\dfrac{\partial e_\theta}{\partial \rho}, \\ \xi_\rho = v_\rho\dfrac{\partial e_\rho}{\partial \rho} + v_z\dfrac{\partial e_\rho}{\partial z}. \end{cases} \tag{73}$$

Интегрируя выражения (73) с учетом соотношений (54), (58), (70) и определяя произвольные постоянные из начальных условий $z = z_0$, $\rho = \rho_0$, $e_z = e_\rho = e_\theta = 0$, получаем:

$$\begin{cases} e_z = \ln\dfrac{\Psi\dfrac{z}{h} - 1 - \Psi}{\Psi\dfrac{z_0}{h} - 1 - \Psi}, \\ e_\theta = \ln\dfrac{\rho}{\rho_0}, \\ e_\rho = -e_z - e_\theta. \end{cases} \tag{74}$$

После того как деформации на центральном участке станут постоянными, выражения (74) примут вид

$$\begin{cases} e_z = \ln\dfrac{R^2 - r_0^2}{1 - r_0^2}, \\ e_\theta = \dfrac{1}{2}\ln\dfrac{\rho^2}{r_0^2 + (\rho^2 - r_0^2)\left(\dfrac{R^2 - r_0^2}{1 - r_0^2}\right)}. \end{cases} \tag{75}$$

С учетом третьего выражения системы (74) общая формула для определения накопленной деформации может быть приведена к виду:

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(e_z - e_\rho)^2 + (e_\rho - e_\theta)^2 + (e_\theta - e_z)^2} = 1{,}155\sqrt{e_z{}^2 + e_z e_\theta + e_\theta{}^2}\,. \qquad (76)$$

При выдавливании рассматриваемых деталей при $\rho = r_0$ из второго выражения системы (75) следует, что $e_\theta = 0$. С учетом этого из зависимости (76) вытекает, что накопленная деформация в выдавленной части стержня равна:

$$e_i = 1{,}155 \ln \frac{R^2 - r_0^2}{1 - r_0^2}\,. \qquad (77)$$

В области 2 определение деформированного состояния выполняем аналогично. Скорости течения частиц следующие:

$$\begin{cases} v_z = -v_0 \dfrac{z}{h}, \\ v_\rho = -\dfrac{v_0}{2h}\left(\dfrac{R^2}{\rho} - \rho\right). \end{cases} \qquad (78)$$

Определяем связь между текущими координатами частицы и её начальными координатами:

$$\begin{cases} z = z_0 e^{-n}, \\ \rho = \sqrt{R^2 - \left(R^2 - \rho_0^2\right)e^n}\,. \end{cases} \qquad (79)$$

Находим скорости деформаций:

$$\begin{cases} \xi_\rho = \dfrac{v_0}{2h}\left(\dfrac{R^2}{\rho^2} + 1\right), \\ \xi_\theta = -\dfrac{v_0}{2h}\left(\dfrac{R^2}{\rho^2} - 1\right), \\ \xi_z = -\dfrac{v_0}{h} \end{cases} \qquad (80)$$

и интенсивность скоростей деформации

$$\xi_{i2} = \beta\left|\xi_{\max}\right| = 1{,}1\frac{v_0}{2h}\left(\frac{R^2}{\rho^2} + 1\right). \qquad (81)$$

Полагая, что в области 2 деформации $e_z = e_z(z)$, $e_\rho = e_\rho(z)$, $e_\theta = e_\theta(z)$, приводим систему (73) к виду

$$\begin{cases} \xi_z = v_z \dfrac{de_z}{dz}, \\ \xi_\rho = v_z \dfrac{de_\rho}{dz}, \\ \xi_\theta = v_z \dfrac{de_\theta}{dz} \end{cases} \tag{82}$$

и после интегрирования и определения произвольных постоянных получаем формулы для нахождения накопленных деформаций:

$$\begin{cases} e_z = -\ln \dfrac{z_0}{z}, \\ e_\theta = -\ln \dfrac{\rho_0}{\rho}. \end{cases} \tag{83}$$

Отметим, однако, что целью нашего исследования является расчет накопленных деформаций при обработке по схеме на рис. 51. При этом ясно, что накопленные деформации будут иметь разную величину в зависимости от расстояния от оси изготавливаемой детали. Чем ближе к оси, тем накопленные деформации меньше. Ставя перед собой задачу оценить накопленную деформацию в наиболее трудно измельчаемой области заготовки, достаточно просчитать деформацию по формуле (77). Степень радиального обжатия заготовки учитывается присутствием в формуле радиуса R. Что касается накопленных деформаций в области 2, то они на установившемся этапе пластической деформации будут больше, чем в области 1, и приведут к большему измельчению зерен.

5.4. Исследование величин накопленных деформаций при измельчении зерен порошковых заготовок осевым сжатием с одновременным радиальным выдавливанием

Далее рассмотрим кинематику течения частиц при перемещении заготовки из участка полости меньшего диаметра в участок большего диаметра.

Высота открывающегося участка А полости большего диаметра зависит от скорости $v_м$, с которой перемещается матрица согласно рис. 51, *а* и 125.

Подбирая эту скорость, можно всегда обеспечить заполнение материалом заготовки открывающегося пространства в матрице. Затекание материала заготовки в это пространство будет эквивалентно радиальному выдавливанию [12, 20], и для проведения анализа кинематики течения и определения накопленных деформаций можно использовать математический аппарат, приведенный в работах для радиального выдавливания полой заготовки.

Расчетная схема операции приведена на рис. 126.

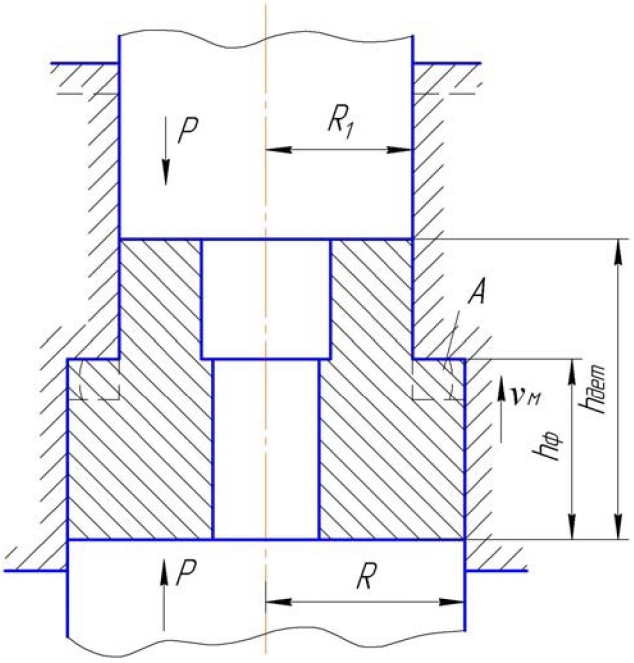


Рис. 125. Схема заполнения матрицы при радиальном выдавливании заготовки

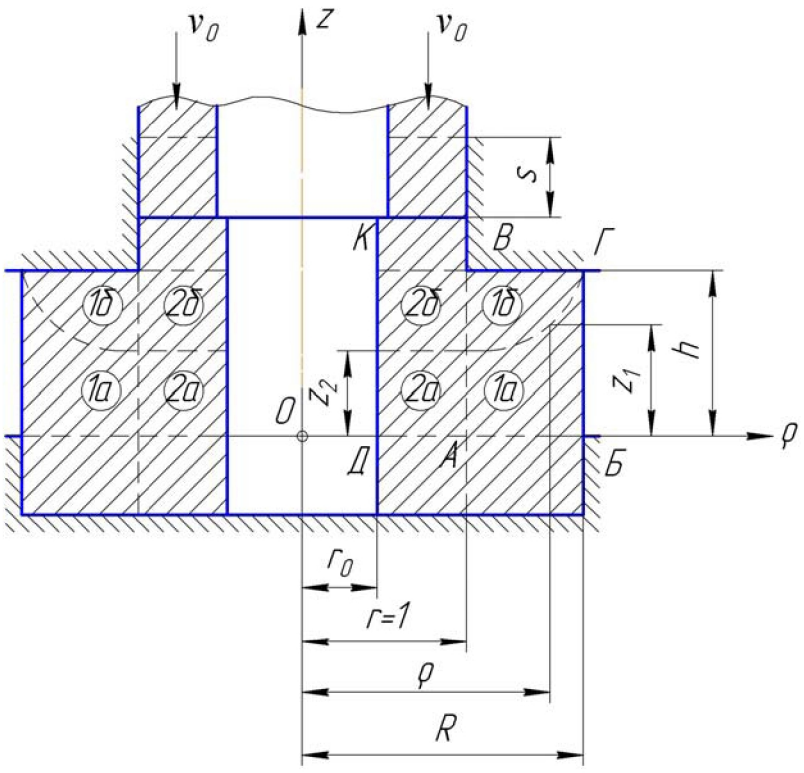


Рис. 126. Зоны деформированного состояния при радиальном выдавливании заготовки

При радиальном выдавливании имеют место четыре зоны с различным деформированным состоянием. Эти зоны показаны на рис. 126 для наиболее общего случая радиального выдавливания заготовки. При одностороннем вы-

давливании распределение накопленных деформаций относительно середины толщины поперечного выступа будет несимметричным. Поле деформаций в зоне 2б является стационарным, поскольку все материальные частицы поступают в эту зону из жесткой области через верхнюю границу очага пластической деформации.

Соответственно частицы, имеющие одинаковую начальную координату ρ_0, проходят до выхода в поперечный выступ один и тот же путь, начальная координата которого $z_0 = h$. Из этой зоны частицы поступают в зону 1б, поле деформаций в которой также является стационарным. В зоне 2а поле деформаций является нестационарным, обусловливая соответствующую нестационарность поля деформаций и в зоне 1а. Накопленные деформации по высоте зон 1а и 2а распределены равномерно.

Расчет накопленных деформаций производится в следующей последовательности.

1. По заданному радиусу получаемого выступа определяется величина рабочего хода

$$s = \frac{(R^2 - 1)h}{1 - r_0^2} \tag{84}$$

или, наоборот, определяется радиус выступа, соответствующий заданной величине рабочего хода:

$$R = \sqrt{1 + (1 - r_0^2)\frac{s}{h}}\ . \tag{85}$$

2. Вычисляется вспомогательная величина

$$n = \frac{s}{h}. \tag{86}$$

3. Находится осевая координата границы между зонами 2а и 2б:

$$z_2 = he^{-n}. \tag{87}$$

4. Определяется накопленная деформация в точке А (рис. 126):

$$e_{i\text{A}} = n\sqrt{1 + \frac{r_0^4}{3}}\ . \tag{88}$$

5. Накопленная деформация в точке В $e_{iB} = 0$, а при необходимости определения накопленной деформации в произвольной точке зоны 2б используется формула

$$e_{i2\text{б}} = \sqrt{1 + \frac{r_0^4}{3}}\ln\frac{h}{z}\ . \tag{89}$$

Следует отметить, что распределение накопленных деформаций в зонах 2а и 2б от радиуса ρ не зависит, то есть, например, эпюры накопленных деформаций вдоль линий АВ и ДК будут одинаковы.

6. Вычисляется накопленная деформация в точке Б (она будет одинакова по всей линии БГ):

$$e_{i\text{Б}} = 1{,}155 \ln R . \tag{90}$$

7. Вычисляется средняя накопленная деформация в области 2, включающей зоны 2а и 2б:

$$e_{i2} = 0{,}5n(1 + e^{-n}) . \tag{91}$$

8. Определяется средняя накопленная деформация во всем очаге пластической деформации:

$$e_i = \frac{e_{i\text{Б}}(2R^2 - R - 1) + e_{i2}(R^2 + R + 1 - 3r_0^2)}{3(R^2 - r_0^2)} . \tag{92}$$

Формулы (77) и (92) позволяют оценить величину деформации, накапливаемой за каждую из чередующихся операций: осевого сжатия с одновременным прямым выдавливанием или осевого сжатия с одновременным радиальным выдавливанием соответственно. Оценив суммированием деформацию, накапливаемую за одно чередование операций, можно рассчитать, сколько раз надо провести чередование этой пары операций для достижения накопленной деформации, требуемой с позиций обеспечения наноструктурного состояния заготовки.

Таким образом, в изложенном теоретическом разделе получены следующие результаты.

1. Выведены зависимости для расчета силы уплотнения засыпанной в матрицу порции порошка заготовки до начала её обработки перемещением из участка полости матрицы одного диаметра в участок другого диаметра.

2. С помощью этих зависимостей, в связи с применением схемы уплотнения, исключающей так называемые перепрессовочные трещины, сила определяется не из условия недопущения указанных трещин, а из условия достижения требуемой плотности заготовки.

3. В процессе анализа выведены формулы для оценки накопленных деформаций. Эти формулы позволяют рассчитать количество циклов чередования операций прямого и радиального выдавливания с противодавлением, при котором будет накоплена деформация, позволяющая измельчить зерно до заданных величин. Создана методика по теоретическому расчету накопленных деформаций с целью определения технологических циклов повтора чередования операций для требуемого измельчения порошка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебнике рассмотрены технологические процессы, в которых используются специальные методы штамповки, в первую очередь, объемной. Эти специальные методы перспективны тем, что они позволяют улучшить структуру и качество изготавливаемых штампованных поковок, достичь новых физических свойств и механических характеристик создаваемых изделий. Из анализа рассмотренных технологических процессов видно, что эффективно применять рассмотренные методы на практике можно только при создании специализированного технологического оборудования для их реализации.

Создаваемое специализированное оборудование, как правило, значительно малогабаритнее и проще, чем универсальные кузнечно-штамповочные прессы и молоты. Оно менее металлоемко. Благодаря меньшим габаритам и металлоемкости это специализированное оборудование может быть установлено на верхних этажах производственных зданий или на передвижных платформах.

В целом, специальные методы объемной штамповки в совокупности со специализированным технологическим оборудованием для их реализации – это отдельное научно-техническое направление, развитие которого позволит существенно интенсифицировать обработку материалов давлением. Также оно позволит изготавливать с помощью обработки давлением изделия из создаваемых непосредственно в процессе их производства новых конструктивных материалов.

Поскольку в настоящее время усилия ученых всего мира концентрируются на создании наноструктурированных материалов, обработка давлением сыграет свою существенную роль в подходе, направленном на измельчение структуры: «от крупного – к мелкому». При этом наибольшими перспективами в этом обладают именно специальные методы обработки давлением, реализуемые на специализированном технологическом оборудовании.

В учебнике изложена теория расчета величин накопленных деформаций при обработке порошковых заготовок по предложенной авторами схеме на созданных по проекту авторов специализированных прессах.

В литературных источниках, написанных материаловедами, приведены наноструктуры заготовок в зависимости от накопленной деформации. Рассчитав с использованием изложенной в учебнике теории количество циклов деформирования, необходимое для накопления определенной деформации и воспользовавшись литературными данными материаловедов, можно прогнозировать полученную в результате обработки на созданных специализированных прессах наноструктуру изделий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алифанов, А.В. Новые методы холодного деформирования металлов и пути их совершенствования / А.В. Алифанов, Л.В. Захаревич. – Минск: БелНИИНТИ. – 43 с.

2. Артес, А.Э. Групповое производство деталей холодной объемной штамповкой / А.Э. Артес. – М.: Машиностроение, 1991. – 192 с.

3. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Академкнига, 2007. – 398 с.

4. Васильчиков, М.В. Поперечная прокатка изделий с винтовой поверхностью / М.В. Васильчиков, М.М. Волков. – М.: Машиностроение, 1968. – 142 с.

5. Воронцов, А.Л. Прогнозирование макроструктуры штампованных изделий / А.Л. Воронцов, А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова // Заготовительные производства в машиностроении. – 2005. – №5. – С. 37-43.

6. Высокоскоростное деформирование металлов / пер. с англ; под ред. А.М. Шахназарова. – М.: Машиностроение, 1966. – 175 с.

7. Высокоскоростные способы прессования деталей из порошковых материалов / К.Н. Богоявленский, П.А. Кузнецов, К.К. Мертенс [и др.]. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 168 с.

8. Гельфанд, Б.Е. Объемные взрывы / Б.Е. Гельфанд, М.В. Сильников. – СПб.: Астерион, 2008. – 374 с.

9. Гуляев, Ю.В. Углеродные нанотрубные структуры – новый материал для эмиссионной электроники / Ю.В. Гуляев // Вестн. РАН. Т. 73. – № 5. – 2003. – С. 389-391.

10. Деформация металлов взрывом / А.В. Крупин, В.Я. Соловьев, Н.И. Шефтель [и др.]. – М.: Металлургия, 1975. – 416 с.

11. Деформация металлов жидкостью высокого давления / В.И. Уральский, В.С. Плахотин, Н.И. Шефтель [и др.]. – М.: Металлургия, 1976. – 424 с.

12. Дмитриев, А.М. Сжатие полой цилиндрической заготовки в закрытой матрице / А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов, Н.В. Коробова // Заготовительные производства в машиностроении. – 2006. – № 3. – С. 33-37.

13. Дмитриев, А.М. Специализированные прессы для обработки материалов давлением и их технологическое применение: учеб. пособие / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 112с.

14. Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Определение накопленных деформаций при измельчении зерен порошковых заготовок обработкой давлением / А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова // Металлообработка. – 2008. – № 6. – С. 44-49.

15. Дмитриев, А.М. Кузнечно-штамповочный автомат для бокового выдавливания / А.М. Дмитриев, А.Г. Овчинников, Е.В. Пахомов // Труды МВТУ.

– № 229. Машины и технология обработки металлов давлением. – Вып. 11. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1976. – С. 19-25.

16. Евстифеев, В.В. Технология и оснастка специальных способов обработки металлов давлением: учеб. пособие для вузов / В.В. Евстифеев, Е.Н. Меркушев. – Омск, 2005. – 190 с.

17. Изготовление заготовок и деталей пластическим деформированием / В.М. Авдеев, Л.Б. Аксенов, И.С. Алиев [и др.]; под ред. К.Н. Богоявленского, В.В. Риса, А.М. Шелестеева. – Л.: Политехника, 1991. – 351 с.

18. Исаченков, Е.И. Штамповка резиной и жидкостью / Е.И. Исаченков. – М.: Машиностроение, 1967. – 367 с.

19. Коробова, Н.В. Исследование величин накопленных деформаций при измельчении зерен порошковых заготовок осевым сжатием с одновременным прямым выдавливанием / Н.В. Коробова // Изв. ТулГУ. Технические науки. – Вып. 2. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. – С. 113-123.

20. Коробова, Н.В. Исследование величин напряжений при уплотнении порошковой заготовки в закрытой матрице / Н.В. Коробова // Изв. ТулГУ. Технические науки. – Вып. 1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. – С. 65-72.

21. Клячко, Л.И. Оборудование и оснастка для формования порошковых материалов / Л.И. Клячко, А.М. Уманский, В.Н. Бобров. – М.: Металлургия, 1986. – 336 с.

22. Клушин, В.А. Совершенствование поперечно-клиновой прокатки / В.А. Клушин, Е.М. Макушок, В.Я. Щукин. – Минск: Наука и техника, 1980. – 280 с.

23. Кривонос, Г.А. Процессы и оборудование для газостатической обработки / Г.А. Кривонос, А.Д. Зверев, Л.Ю. Максимов. – М.: Металлургия, 1994. – 301 с.

24. Лузгин, Н.П. Изготовление пружин / Н.П. Лузгин. – М.: Высшая школа, 1968. – 200 с.

25. Лякишев, Н.П. Получение и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов / Н.П. Лякишев, М.И. Алымов. – М.: ЭЛИЗ, 2007. – 148с.

26. Лякишев, Н.П. Наноматериалы конструкционного назначения / Н.П. Лякишев, М.И. Алымов, С.В. Добаткин // Конверсии в машиностроении. – 2002. – № 6. – С. 125-129.

27. Мансуров, И.З. Современное автоматизированное оборудование для формообразования изделий из металлопорошков: обзор / И.З. Мансуров, А.И. Бромберг, А.А. Ларин. – М.: НИИМаш, 1984. – 76 с. (Сер. С-3. Кузнечно-прессовое машиностроение).

28. 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. Пункт 2.10.2. Специализированные прессы. - С. 175-180 // Машиностроение. Энциклопедия / ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 926 с.

29. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направлений исследований / пер. с англ.; под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса, П. Аливисатоса. – М.: Мир, 2002. – 292 с.

30. Наугольных, К.А. Электрические разряды в воде / К.А. Наугольных, Н.А. Рой. – М.: Наука, 1971. – 155 с.

31. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / Г.А. Гулый, П.П. Малюшевский, Е.В. Кривицкий [и др.]; под ред. Г.А. Гулого. – М.: Машиностроение, 1977. – 320 с.

32. Пластическая обработка металлов простым сдвигом / В.М. Сегал, В.И. Резников, А.Е. Дробышевский [и др.] // Металлы. – 1981. – № 1. – С. 99-105.

33. Поперечно-клиновая прокатка / Г.В. Андреев, В.А. Клушин, Е.М. Макушок [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1974. – 160 с.

34. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учеб. для вузов / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин [и др.]. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.

35. Прогрессивные технологические процессы штамповки деталей из порошков и оборудование / Г.М. Волкогон, А.М. Дмитриев, Е.П. Добряков [и др.]; под общ. ред. А.М. Дмитриева, А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.

36. Прозоров, Л.В. Прессование металлов жидкостью высокого давления / Л.В. Прозоров, А.А. Костава, В.Д. Ревтов. – М.: Машиностроение, 1972. – 152 с.

37. Радомысельский, И.Д. Конструкционные порошковые материалы / И.Д. Радомысельский, Г.Г. Сердюк, Н.И. Щербань. – Киев: Техника, 1985. – 152 с.

38. Радомысельский, И.Д. Некоторые особенности уплотнения порошков на разных стадиях прессования / И.Д. Радомысельский, Н.И. Щербань // Порошковая металлургия. – 1980. – № 11. – С. 12 - 19.

39. Растопчин, С.А. Резка с редуцироваием / С.А. Растопчин, В.В. Губарев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 9. – С. 9-10.

40. Розанов, Б.В. Технология и оборудование для гидростатического прессования / Б.В. Розанов, Л.Ю. Максимов. – М.: НИИИНФОРМТяжмаш, 1971. – 58 с.

41. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – 6-е изд. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1979. – 520 с.

42. Сегал, В.М. Обработка литых образцов простым сдвигом / В.М. Сегал, О.А. Ганаго, Д.А. Павлик // Кузнечно-штамповочное производство. – 1980. – № 2. – С. 7-9.

43. Семибратов, Г.Г. Точная раскатка валов и осей / Г.Г. Семибратов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 133 с.

44. Скороход, В.В. Условие пластичности пористых тел / В.В. Скороход, Л.И. Тучинский // Порошковая металлургия. – 1979. – № 4. – С. 158 - 163.

45. Смыслов, А.Ю. К теории пластичности пористых сред / А.Ю. Смыслов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1980. – № 4. – С. 107-110.

46. Соловцов, С.С. Безотходная разрезка сортового проката в штампах / С.С. Соловцов. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.

47. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением / В.А. Голенков, А.М. Дмитриев, В.Д.Кухарь [и др.]; под общ. ред. В.А. Голенкова, А.М. Дмитриева. – М.: Машиностроение, 2004. – 464 с.

48. Тимошенко, В.А. Безоблойная штамповка поковок с изогнутой осью / В.А. Тимошенко, В.В. Ермилов. – Кишинев: Штиинца, 1980. – 84 с.

49. Хыбемяги, А.И. Холодное выдавливание рельефных полостей технологической оснастки / А.И. Хыбемяги. – М.: Машиностроение, 1981. – 79 с.

50. Церна, И.А. Анализ механического устройства разгрузки винтового пресса для штамповки с кручением / И.А. Церна, А.В. Сафонов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1985. – № 11. – С. 95-99.

51.Чачин, В.Н. Электрогидравлическая обработка машиностроительных материалов / В.Н. Чачин. – Минск: Наука и техника, 1978. – 184 с.

52. Экономичные методы формообразовния деталей / под ред. К.Н. Богоявленского, В.В. Риса. – Л.: Лениздат, 1984. – 144 с.

53. Электроразрядная обработка материалов. Т. 2 / Е.М. Левинсон, В.С. Лев, Б.Г. Гуткин [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1971. – 206 с.

54. Clark D.S., Wood D.S. The Tensile Impact Properties of Some Metals and Alloys, Trans. Am Soc Metals, 42 (1950).- P. 45-74.

55. Hirschvogel M. Beitrag zur Plasizitatstheorie poroser, kompressible Materialien mit Anwendung in der Pulvermetallurgie: Dr.- Ingenieur Dissertation. Universitat Stutgart, 1975. - 115p.

56. Honess H. Uber des plastische Verhalten von Sintermetallen bei Rauntemperatur. - Berichte aus dem Institut fur Umformtechnik Universitat Stutgart. Essen: W. Girandet, 1976. - 152p.

57. Mannesmann Demag. Iron and Steel Powders for Sintered Components. 59 p.

58. Oyane M., Shima S., Kono Y. Theory of plasticity for porous metals // Bulletin of the JSME. - 1973. - V. 16, № 99. - P. 1254-1262.

59. Riabinin Iu. N. Soviet Physics Technical Physics. 1. No. 12, 1956.

60. Sheet Metal Forming Technology, ASD Interim Report 7-871 (II), Contract AF 33 (657) - 7314, Chance Vought Corporation, Dallas, Texas, May, 1962.

Учебное издание

Дмитриев Александр Михайлович,
Гречников Федор Васильевич,
Коробова Наталья Васильевна

КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
Часть 1
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ПРЕССЫ ДЛЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Учебник

Редактор Н. С. К у п р и я н о в а
Доверстка Т. Е. П о л о в н е в а

Подписано в печать 4.10.2012. Формат 60х84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 10,25.
Тираж 100 экз. Заказ . Арт. – 1(Д2)/2012.

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086, Самара, Московское шоссе,34.

Издательство Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086, Самара, Московское шоссе,34.