

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

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ПРЕССЫ  
ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ  
ДАВЛЕНИЕМ  
И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ  
ПРИМЕНЕНИЕ**

**2007**



**САМАРА**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА»

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

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ПРЕССЫ  
ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ  
И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

САМАРА 2007  
Издательство СГАУ  
2007

УДК 621. 97(075)

ББК 34.623

Д 534



**Инновационная образовательная программа  
“Развитие центра компетенции и подготовка  
специалистов мирового уровня в области аэро-  
космических и геоинформационных технологий”**

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Г. В. С м и р н о в,  
канд. техн. наук, С. Д. С м о л ь н и к о в

*Дмитриев А.М.*

Д 534

**Специализированные прессы для обработки материалов давлением и их технологическое применение:** учеб. пособие /  
*А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова.* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 112 с. : ил.

**ISBN 978-5-7883-0669-8**

В пособии рассматриваются основные вопросы компьютерного моделирования, возникающие при решении задач обработки металлов давлением.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 150106 – «Обработка металлов давлением» и «Машины и технология обработки металлов давлением».

УДК 621. 97(075)

ББК 34.623

**ISBN 978-5-7883-0669-8**

© Дмитриев А.М, Гречников Ф.В.,  
Коробова Н.В., 2007

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2007

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Целесообразность создания специализированных прессов для вытяжки деталей пулеобразной формы из листовых заготовок.....	6
2. Пресс для двухстороннего выдавливания в разъемные матрицы поковок деталей с боковыми отроостками....	18
3. Малогабаритные многофункциональные гидравлические прессы.....	28
3.1. Расширение области применения холодной объемной штамповки выдавливанием с активными силами трения.....	30
3.2. Производство высококачественных деталей из металлических порошков.....	52
3.3. Производство нанопорошковых заготовок.....	74
4. Анализ штамповки высокоплотных порошковых деталей.....	80
4.1. Оценка погрешности в описании кинематики течения при отказе от учёта сжимаемости заготовки...	80
4.2. Определение условного напряжения текучести порошковой заготовки.....	89
4.3. Оценка гидростатического давления по размеру...	101
Список используемых источников.....	110

## **ВВЕДЕНИЕ**

Еще в свою бытность студентами, консультируясь с профессором кафедры МГТУ имени Н.Э. Баумана, осуществляющей подготовку специалистов по машинам и технологии обработки металлов давлением, Заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, лауреатом премии Правительства РФ в области науки и техники, доктором технических наук, профессором А.Г. Овчинниковым, авторы предлагаемого учебного пособия осознали перспективность создания специализированных прессов.

Для выполнения штамповки высококачественных деталей, имеющих заданную прочность, волокнистую структуру или наноструктуру, при применении универсальных прессов требуются штампы сложных конструкций. Такие штампы должны осуществлять перемещение нескольких деформирующих заготовку инструментов при специально задаваемом маршруте перемещения каждого инструмента. В результате штампы снабжают дополнительными к имеющимся у универсального пресса приводами. Для размещения таких штампов на уни-

версальных прессах приходится выбирать прессы не по величине номинальной деформирующей силы, а по размерам штампового пространства. Как следствие необходимости большого штампового пространства, универсальные прессы имеют многократное превышение номинальной силы штамповки и мощности привода по сравнению с теми силами и мощностями, которые нужны для осуществления выполняемой технологической операции.

Как будет видно ниже из текста пособия, поскольку штамп должен иметь дополнительный по отношению к приводу универсального пресса второй привод, то приводы целесообразно совместить в единое целое, и получится новый, специализированный пресс. В конструкции этого специализированного пресса можно исключить часть элементов универсального пресса, которые не нужны для выполнения на нем данного конкретного технологического процесса.

Как следствие, достигается большое сокращение энергозатрат в производстве, установочной мощности и металлоемкости оборудования.

Некоторые типы разработанных авторами специализированных прессов для выполняемых на них специфических 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: 1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – матрица, 4 – выталкиватель).

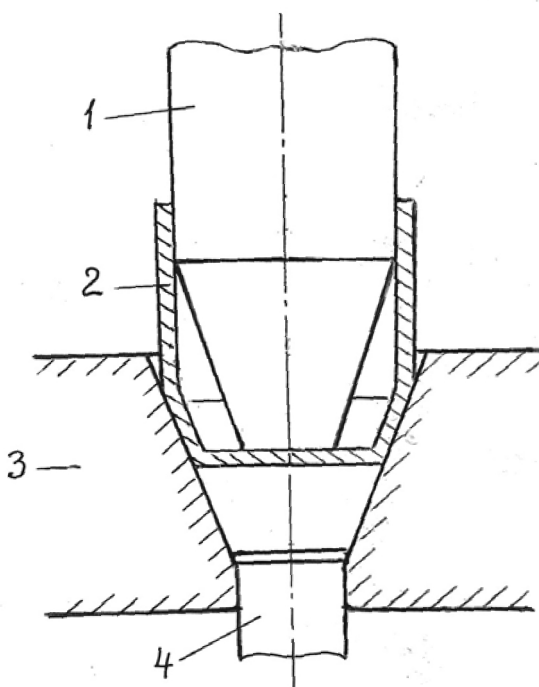


Рис. 1. Схема вытяжки детали пулеобразной формы

Деталь с таким большим отношением высоты к диаметру невозможно получить непосредственно из плоской заготовки, поэтому вытяжку проводят за несколько переходов. На пер-

вом переходе из плоской заготовки вытягивают стакан; на последующих переходах проводят вытяжку из цилиндрических полуфабрикатов, полученных на предыдущих переходах; на заключительном переходе из полуфабриката, имеющего конический придонный участок небольшой длины, вытягивают деталь с протяженным коническим участком.

Особенность деформирования заготовки на последнем переходе заключается в том, что на начальном этапе участок заготовки находящийся вне контакта с пуансоном и матрицей, имеет значительную протяженность. В начале деформирования на этом переходе пуансон воздействует 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.

Образующая заготовки в зазоре между пуансоном и матрицей непрямолинейна, поэтому вытяжку 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.

В определенных условиях часть заготовки, находящаяся в зазоре между пуансоном и матрицей, может терять устойчи-

вость под действием сжимающих тангенциальных напряжений. Это выражается в образовании продольных складок. Однако образование таких складок меньше, чем во фланце плоской заготовки на первом переходе вытяжки. Это объясняется тем, что часть заготовки, находящейся в зазоре между пуансоном и матрицей, на промежуточных стадиях деформирования заключена между донной и цилиндрической частями, в которых потери устойчивости не происходит. В тех случаях, когда при вытяжке наблюдается значительная потеря устойчивости, при которой подчеканка на заключительной стадии деформирования не позволяет выправить образующиеся складки, конический участок детали изготавливают за несколько переходов [1].

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  $\omega$  и  $M_{кр}$ . В то же время пуансон может совершать незначительное движение назад, оказывая сопротивление, величина которого ( $P_c$ ) достаточна для того, чтобы происходило формоизменение заготовки. На втором этапе пуансон движется вниз, проталкивая заготовку через вальцы, которые поворачиваются по стрелке  $\omega$  (рис. 2,б) в направле-

нии, противоположном направлению поворота на первом этапе, при этом валцы оказывают сопротивление их повороту, величина которого ( $M_c$ ) достаточна для формоизменения заготовки.

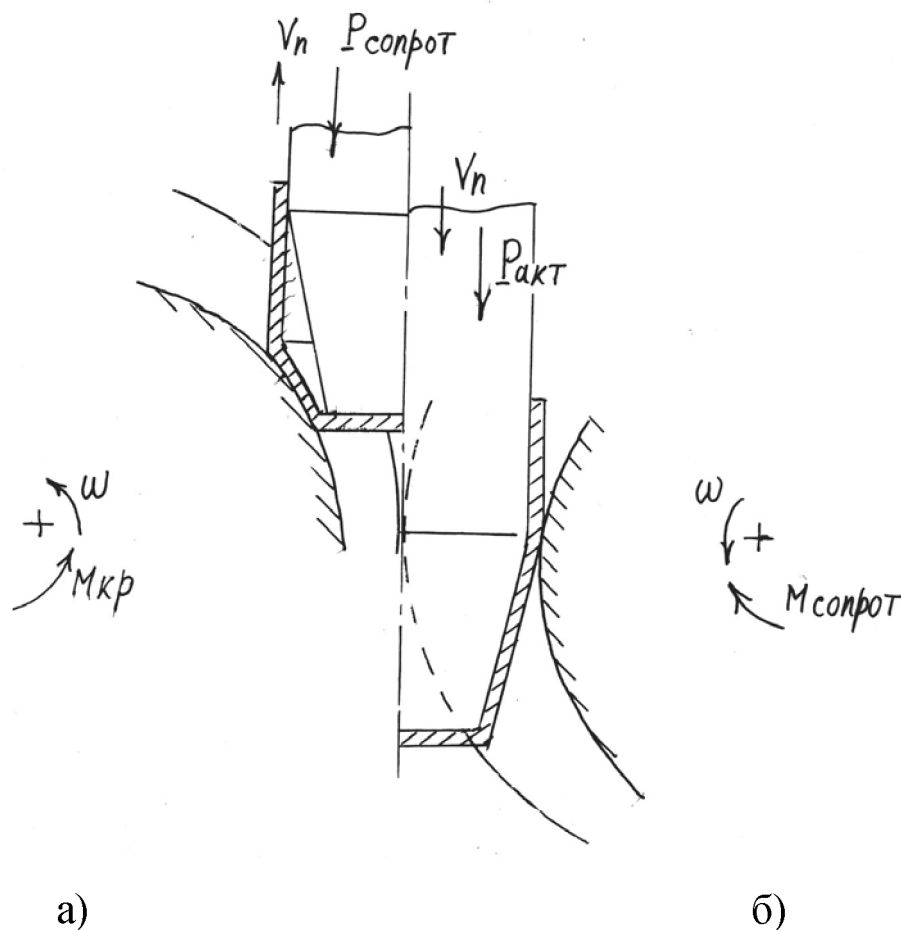


Рис. 2. Схема вытяжки рассматриваемой детали через валцы

Необходимость в двухэтапном деформировании вызвана следующим. Если нет первого этапа и заготовку, имеющую дно диаметром, незначительно меньшим диаметра ее цилиндрической части, устанавливают в валцы, развернутые так, что диаметр образованного ими отверстия соответствует наименьшему диаметру детали, и проводят вытяжку проталкива-

нием заготовки через матрицу, то острые кромки фильеры вальцов врезаются в дно заготовки, что приводит к браку.

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

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 формующего в матрице (вальцах) заготовку, вальцы поворачиваются таким образом, чтобы каждому положению пуансона соответствовал определенный участок их рабочего профиля.

Для формования заготовки необходимо, чтобы описанная матрица изменяла свой профиль с достаточным давлением на заготовку. В показанном на рис. 3 штампе предусмотрено специальное устройство, создающее такое давление (сопротивление повороту вальцов).

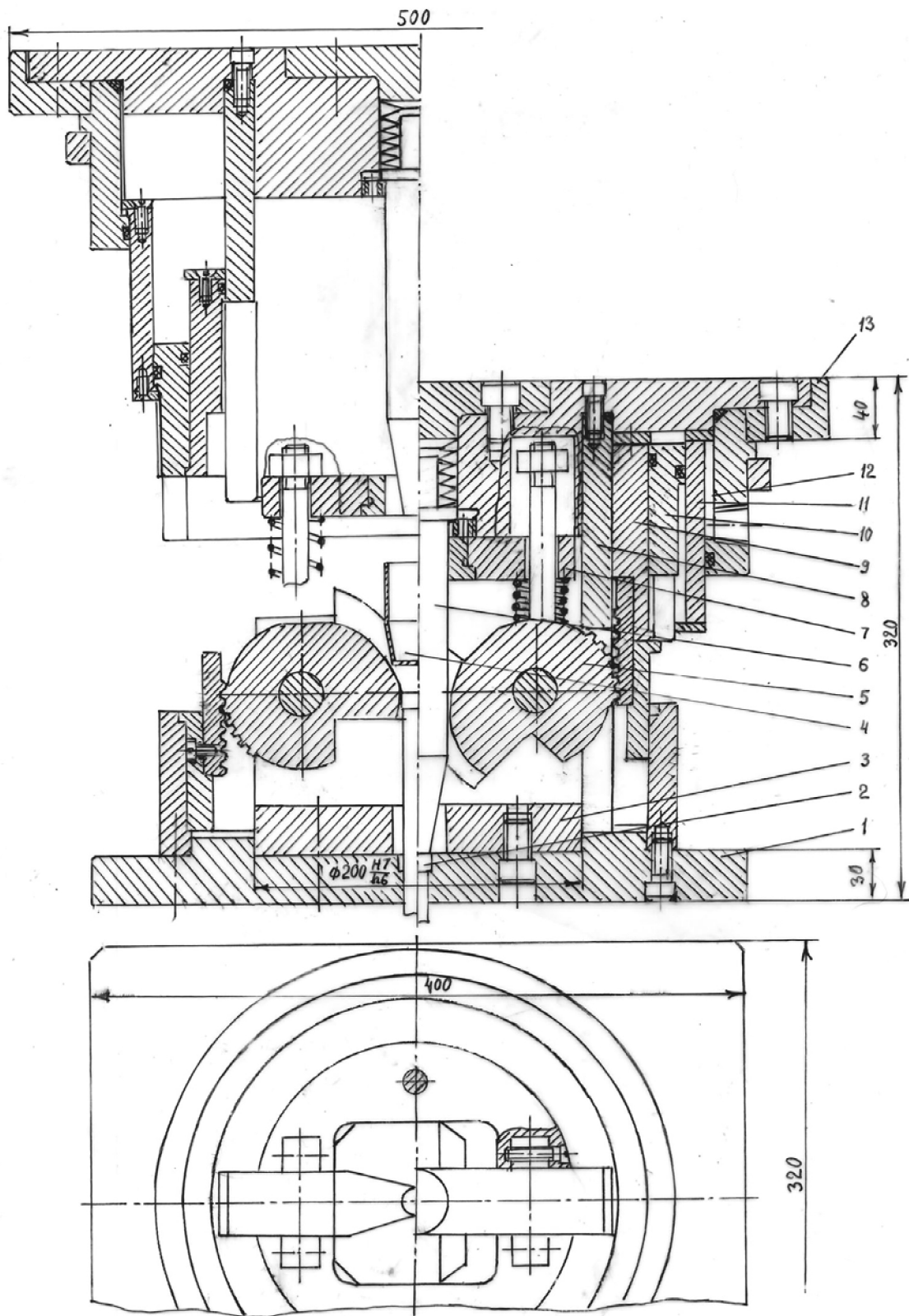


Рис. 3. Конструкция штампа для вытяжки в вальцах

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 формовка заготовки, отверстие для оси и зубчатую часть, взаимодействующую с зубчатой рейкой, через которую создается сопротивление повороту вальцов и таким образом оказывается давление на заготовку при изменении диаметра матрицы.

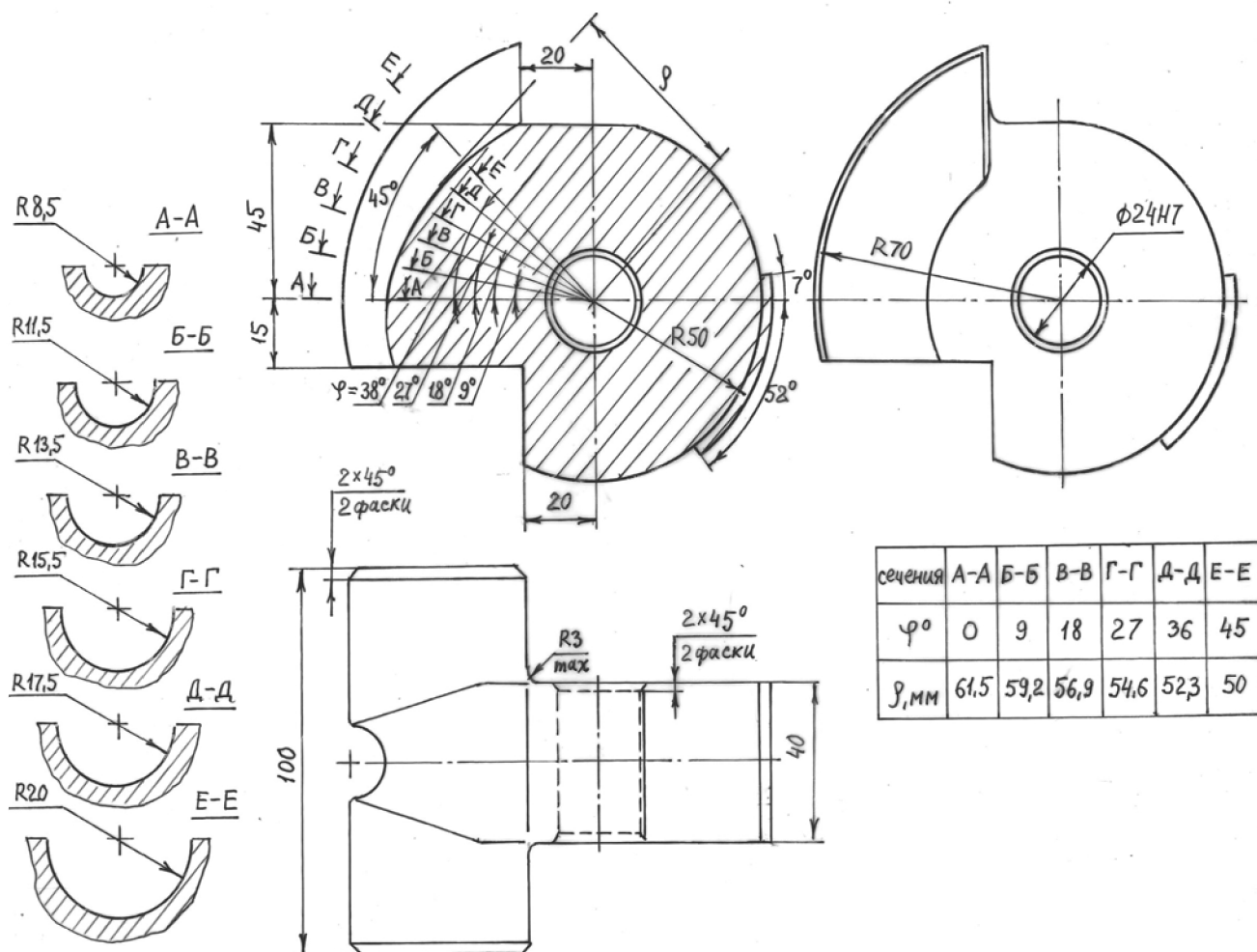


Рис. 4. Чертеж вальца, образующего половину полости матрицы штампа

Вальцы поворачиваются на осях, установленных в выточках опоры 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 формируется 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 винченным 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.

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

Поворот вальцов 5 во время рабочего хода пресса и сопротивление повороту при проталкивании заготовки через вальцы осуществляется гидро- или пневмоцилиндром 11 и

передается через 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 в направлении, противоположном направлению их первоначального 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 валцов 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 валцов, 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 противодействия 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 прессы установочная мощность также значительно превышает мощность, требующуюся для выполнения штамповки. В результате пресс эксплуатируется с низким КПД.

Значительно более экономичным является отказ от использования прессы 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 В РАЗЪЕМНЫЕ МАТРИЦЫ ПОКОВОК ДЕТАЛЕЙ С БОКОВЫМИ ОТРОСТКАМИ**

При разработке специализированных штамповочных машин в основу их закладывают прогрессивные технологические процессы, характеризующиеся высоким качеством изделий, уменьшением отходов, культурой производства, более высокой производительностью и экономичностью. В результате разработки таких технологических процессов должны быть заданы исходные параметры для расчета и конструирования специализированных машин.

Предлагаемая конструкция машины возникла именно из требования выполнения более прогрессивного технологического процесса при штамповке изделий с боковыми отростками.

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 принимают форму бокового отростка. Это приводит к повышению качества изделия с точки зрения механических характеристик.

Авторами было проведено сравнение процессов выдавливания при одностороннем и двухстороннем приложении нагрузки в штампе с разъемными матрицами. Матрицы имели разъем в плоскости осей боковых отростков (горизонтальный разъем).

Схемы процессов одностороннего и двухстороннего выдавливания и формы очага пластической деформации при этих процессах приведены на рис. 5 и 6. Как видно из рисунков, при одностороннем выдавливании очаг пластической деформации смещен относительно оси боковых отростков, течение металла стеснено. При двухстороннем выдавливании этого не наблюдается. Кроме того, длина недеформированной части заготовки, проталкиваемой пуансоном вдоль оси контейнера матрицы, при одностороннем выдавливании вдвое больше, чем при двухстороннем выдавливании.

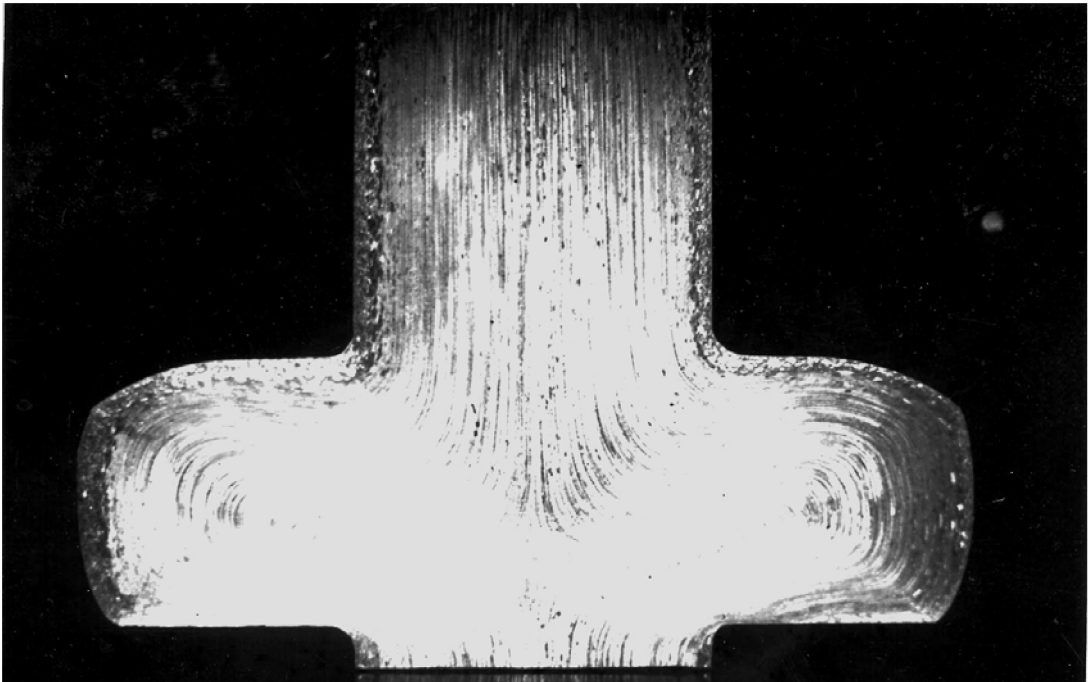


Рис. 5. Стесненная форма очага пластической деформации при одностороннем выдавливании

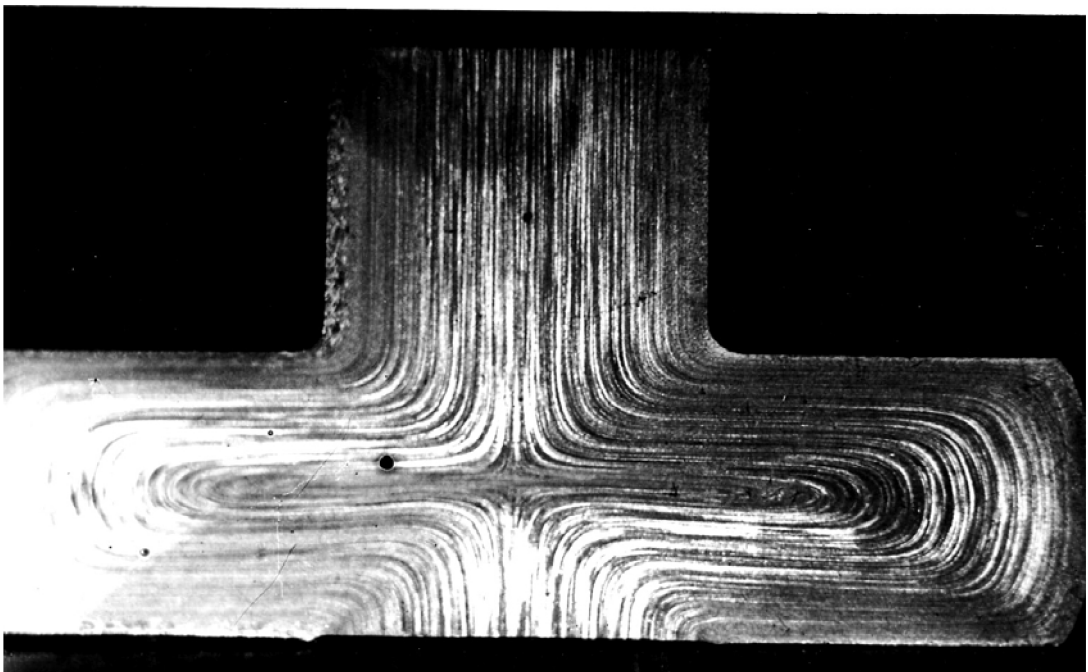


Рис. 6. Равномерное течение материала и симметричный очаг пластической деформации при двухстороннем выдавливании

Вследствие изложенного удельная деформирующая сила при двухстороннем выдавливании снижается на 20-50% (в зависимости от соотношения центральной части и боковых отростков) по сравнению с односторонним. 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.

При одностороннем выдавливании на нижней границе очага пластической деформации имеют место значительные смещения частиц металла, что делает невозможной штамповку материалов, обладающих невысокой пластичностью. При двухстороннем выдавливании этот недостаток отсутствует.

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

При одностороннем выдавливании полуматрица, расположенная против пуансона, изнашивается быстрее, чем вторая полуматрица. При двухстороннем выдавливании износостойкость обеих полуматриц одинакова.

Таким образом, способ двухстороннего выдавливания является более совершенным. Однако выдавливание по этому способу требует применения машин с двухсторонним ходом ползунов.

Нами разработан проект такой машины. Штамповка на ней выполняется автоматически.

При проектировании автомата (рис. 7) были заданы технические условия из расчета процесса двухстороннего бокового выдавливания крестовины, штампуемой на заводе «Ростсельмаш». Размеры крестовины в плане 94 мм x 94 мм.

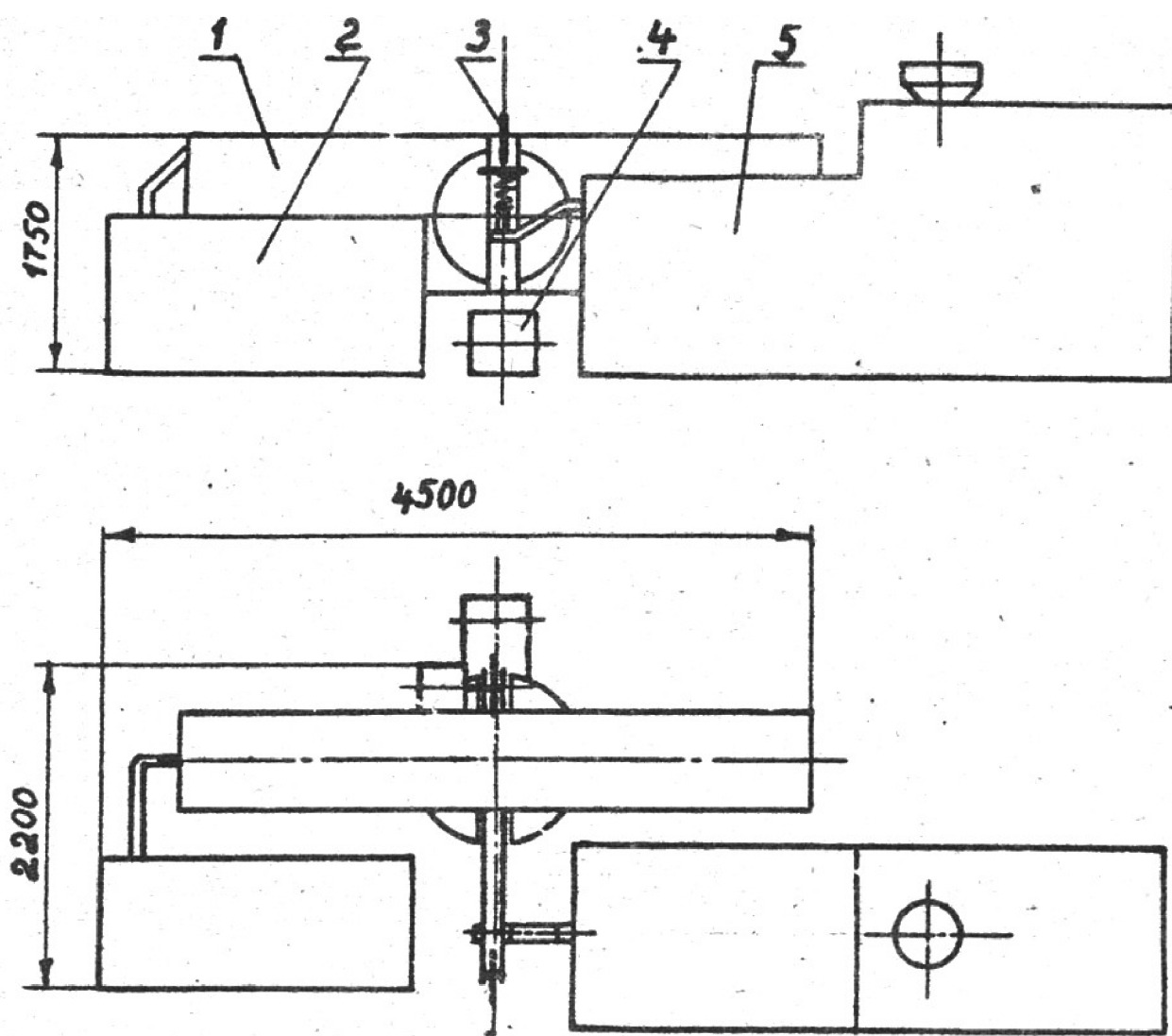


Рис. 7. Автомат для двухстороннего бокового выдавливания в разъемные полуматрицы

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

Автомат (рис. 7) состоит из бесшаботного гидровинтового молота 1, гидропривода 2, механизма подачи заготовок в штамп 3, конвейера 4, на который поступают готовые поковки, индукционного нагревателя 5.

В основу автомата положен бесшаботный гидровинтовой молот с горизонтально движущимися ползунами (рис. 8). Специализация молота 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 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 полости металлом. Внутренние части ползунов продолжают движение, и пуансоны производят выдавливание заготовки.

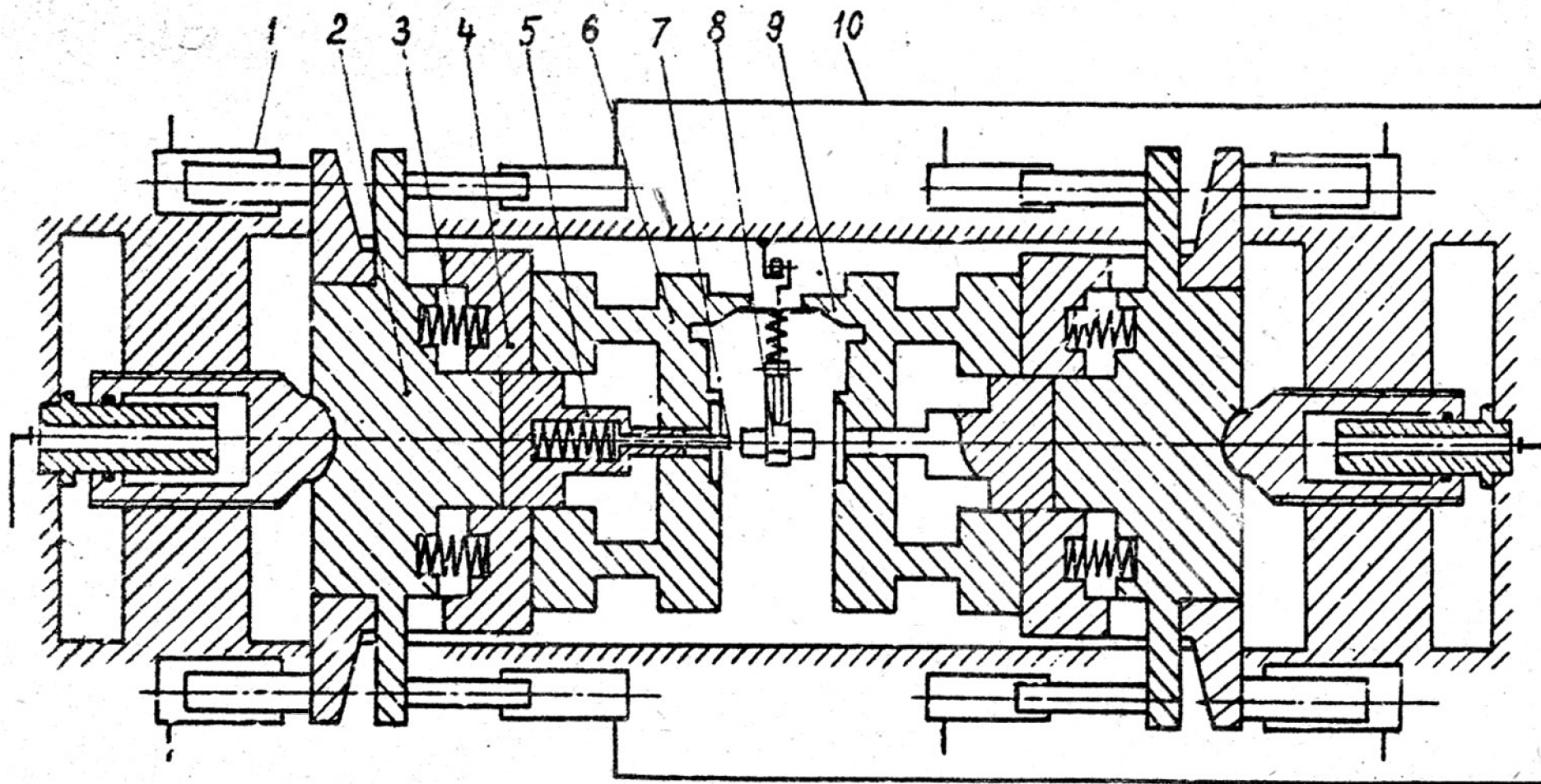


Рис. 8. Бесшаботный гидровинтовой пресс-молот

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.

Для подачи заготовок в штамп использован механизм, выполненный в виде цепного транспортера с подвешенными на нем двадцатью клещами. Транспортер соединен с ползуном машины через редуктор. В конструкцию редуктора введена муфта обгона. Такая конструкция 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. В одном из пуансонов размещен ловитель 7, подпружиненный в направлении оси пуансона. Этим ловителем заготовка из клещей проталкивается в контейнер противоположной полуматрицы.

Полуматрицы смыкаются, и производится деформирование заготовки. При возвратном ходе ползунов пресса следующие клещи с заготовкой входят в штамповое пространство, а готовая поковка выталкивается ловителем на ленточный транспортер, размещенный под штамповым пространством.

Раскрытие клещей для захвата заготовки от индуктора осуществляется неподвижно установленными против полости индуктора кулачками, под которыми проходят клещи.

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 покрыт слоем звукопоглощающего материала – стекловолокна.

Был проведен экономический расчет штамповки крестовины на описанном автомате применительно к программе завода «Ростсельмаш». На заводе «Ростсельмаш» крестовину получают односторонним боковым выдавливанием на универсальном кривошипном прессе. Пресс оснащен сложными механизмами, и штамповка осуществляется автоматически.

Размещение громоздкого штампа и механизма подачи заготовки и удаления поковки потребовали применения прессы с номинальной силой 4 МН вместо 1 МН, необходимого для штамповки. Несмотря на значительные затраты при замене процесса открытой штамповки на штамповку односторонним выдавливанием на таком автоматизированном универсальном прессе «Ростсельмаш» получил экономию, которую в современных ценах следует считать равной 4 млн. 600 тыс. рублей в год. Разработанный автомат позволяет получить экономию по сравнению с автоматизированным прессом завода «Ростсельмаш» 2 млн. 400 тыс. руб. в год, а при замене открытой штамповки (при расчете на ту же программу) 7 млн. руб. в год.

### 3. МАЛОГАБАРИТНЫЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРЕССЫ

В доперестроичный 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.

Целесообразность создания мелких прессов подтвердил опыт Оренбургского завода гидропрессов, выпустившего в конце 80-х годов прошлого века партию прессов силой 50 кН. 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 точностью, 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 деформирующей заготовку инструмента.

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 – пока-

зан 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 внутрикristаллитную и междукristаллитную 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 про-

странстве. 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, обуславливающими 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, возрас-

тающие 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 окалиной 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 переквали-

фикации, 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, делают 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 пере-

численного, относится возможность использования отходов (окалина, стружка) для получения порошков.

Холодное выдавливание позволяет изготавливать 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 конкурентноспособным по сравнению с другими.

Практикой установлено, что величина удельной силы, воспринимаемая пуансонами из сталей Р9М4, Р6М3, Р6М5, ЭП761, твердость которых НРС 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. 9 приведена схема выдавливания с активными силами трения.

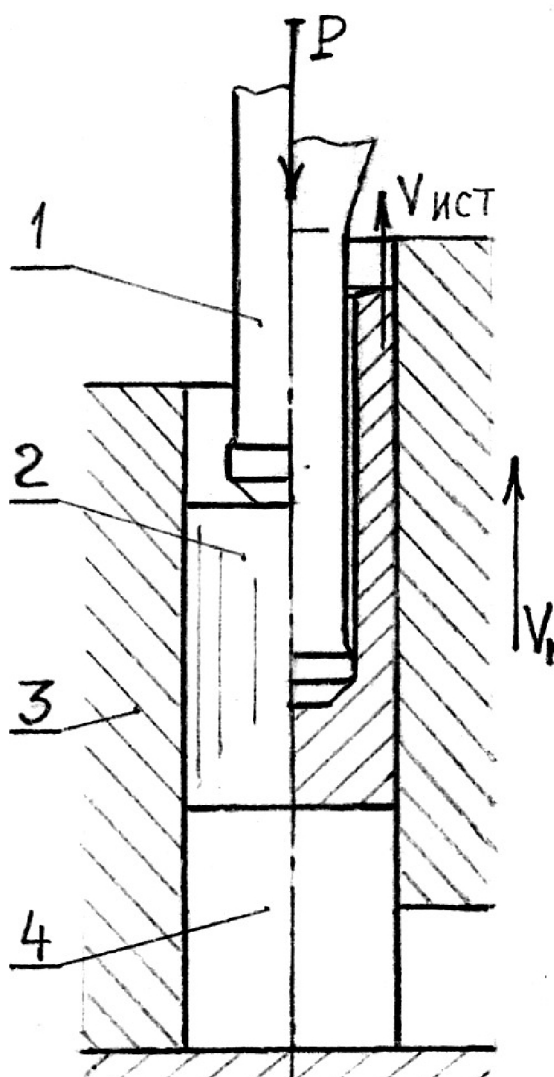


Рис. 9. Схема выдавливания с активными силами трения

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. 9 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.

Практика конструирования штампов для выдавливания с активными силами трения показала, что поскольку в любом случае требуется дополнительная траверса с отдельным гидроприводом, целесообразно отказаться от установки 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. 10.

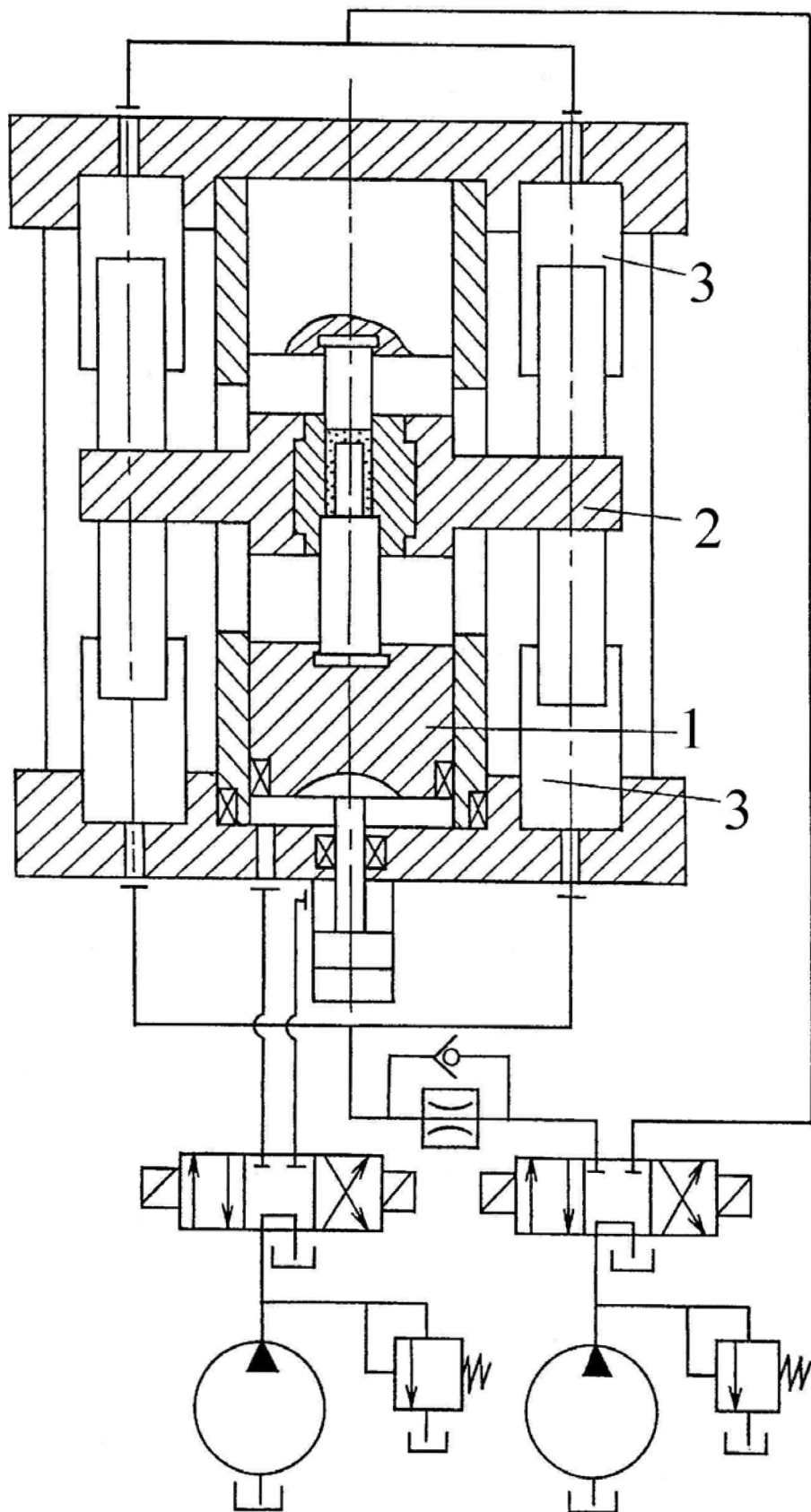


Рис. 10. Конструкция пресса для выдавливания с активными силами трения

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. 11. Масса этого пресса (без приводов) составляет 2 т.

При эксплуатации описанного пресса (рис. 10) выявлено, что траверса 2 имеет недостаточную жесткость и высоту посадочной поверхности в гильзе. В результате в процессе выдавливания возможен перекося 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.12.

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.



Рис. 11. Пресс для выдавливания с активными силами трения

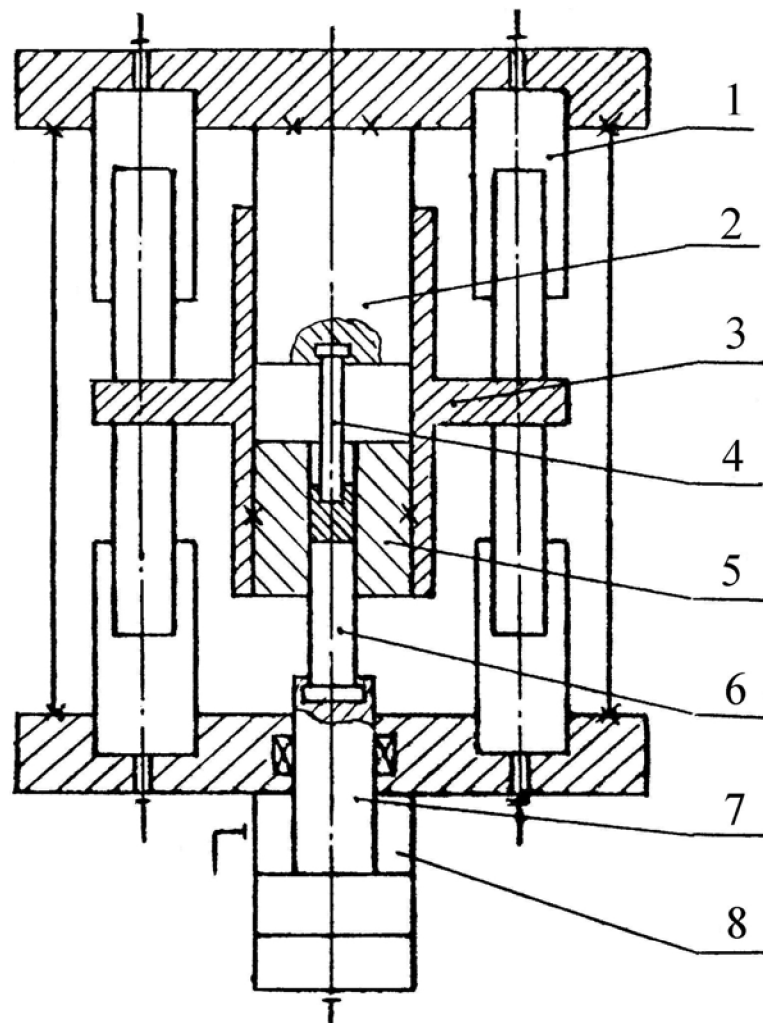


Рис. 12. Схема пресса с повышенной жесткостью траверсы для перемещения матрицы

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. 13), в которой все гидроцилиндры размещены на одной общей оси. При ее изготовлении требуются в основном токарные, круглошлифовальные и простые фрезерные работы.

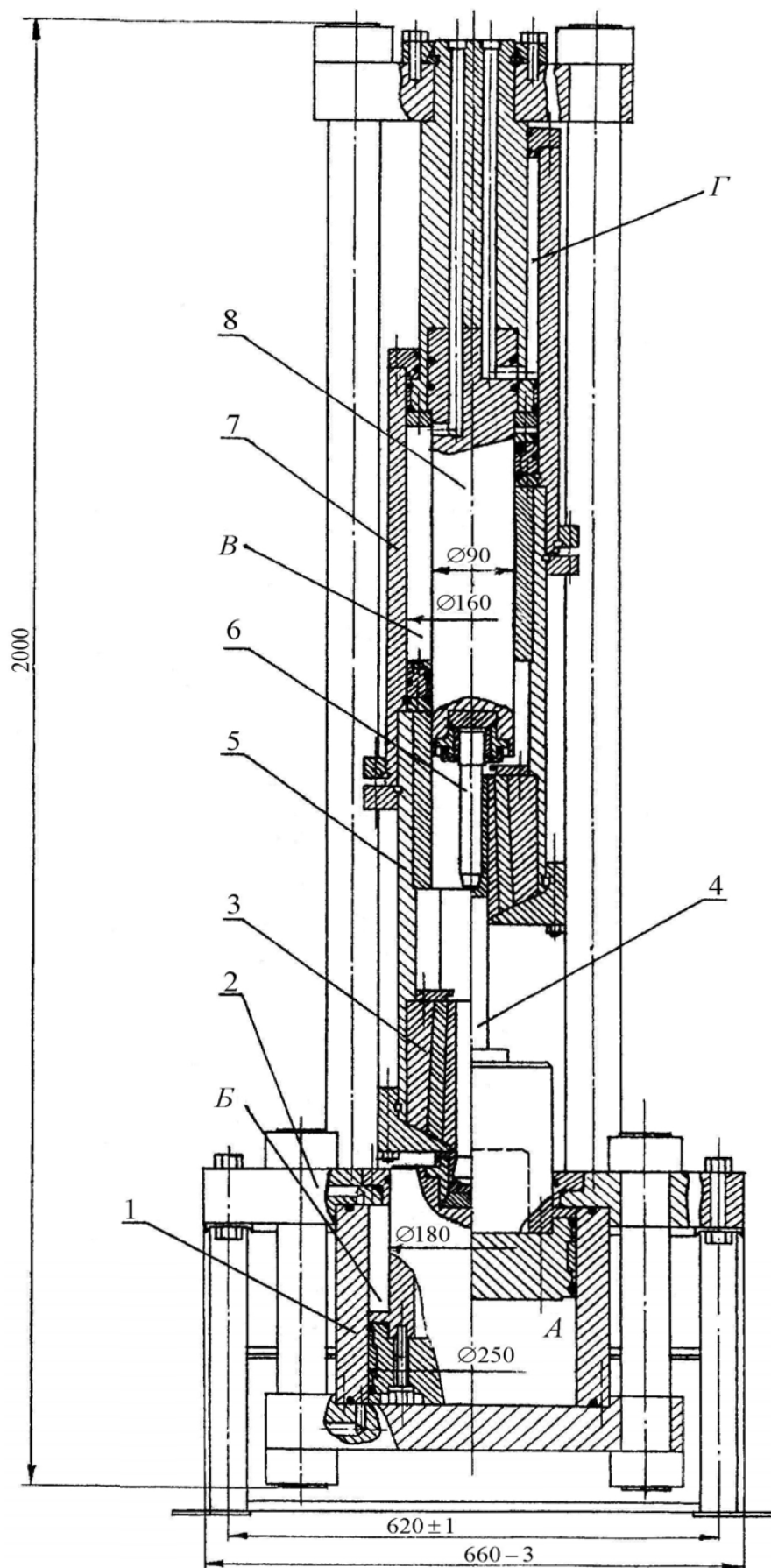


Рис. 13. Конструкция пресса для выдавливания с активными силами трения

В прессе главный гидроцилиндр *1* расположен под столом 2. Плунжер главного гидроцилиндра является ползуном прессы 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 прессы, служащего для перемещения матрицы 3 в процессе деформирования.

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

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

Фотографии прессы приведены на рис. 14, 15.

Техническая характеристика прессы 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	650x500x2000
Масса без привода, кг	1200
Установочная мощность, кВт	8,5

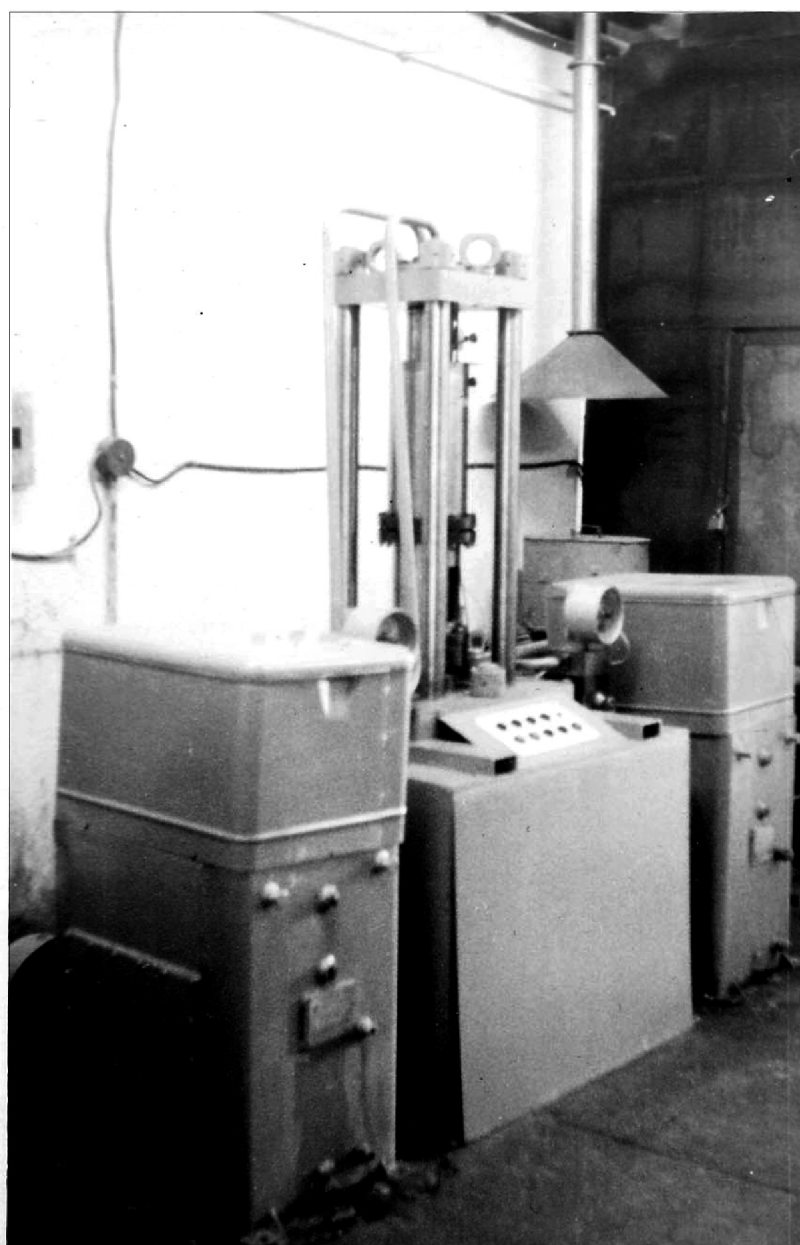


Рис. 14. Пресс для выдавливания с активными силами трения  
на производственном участке

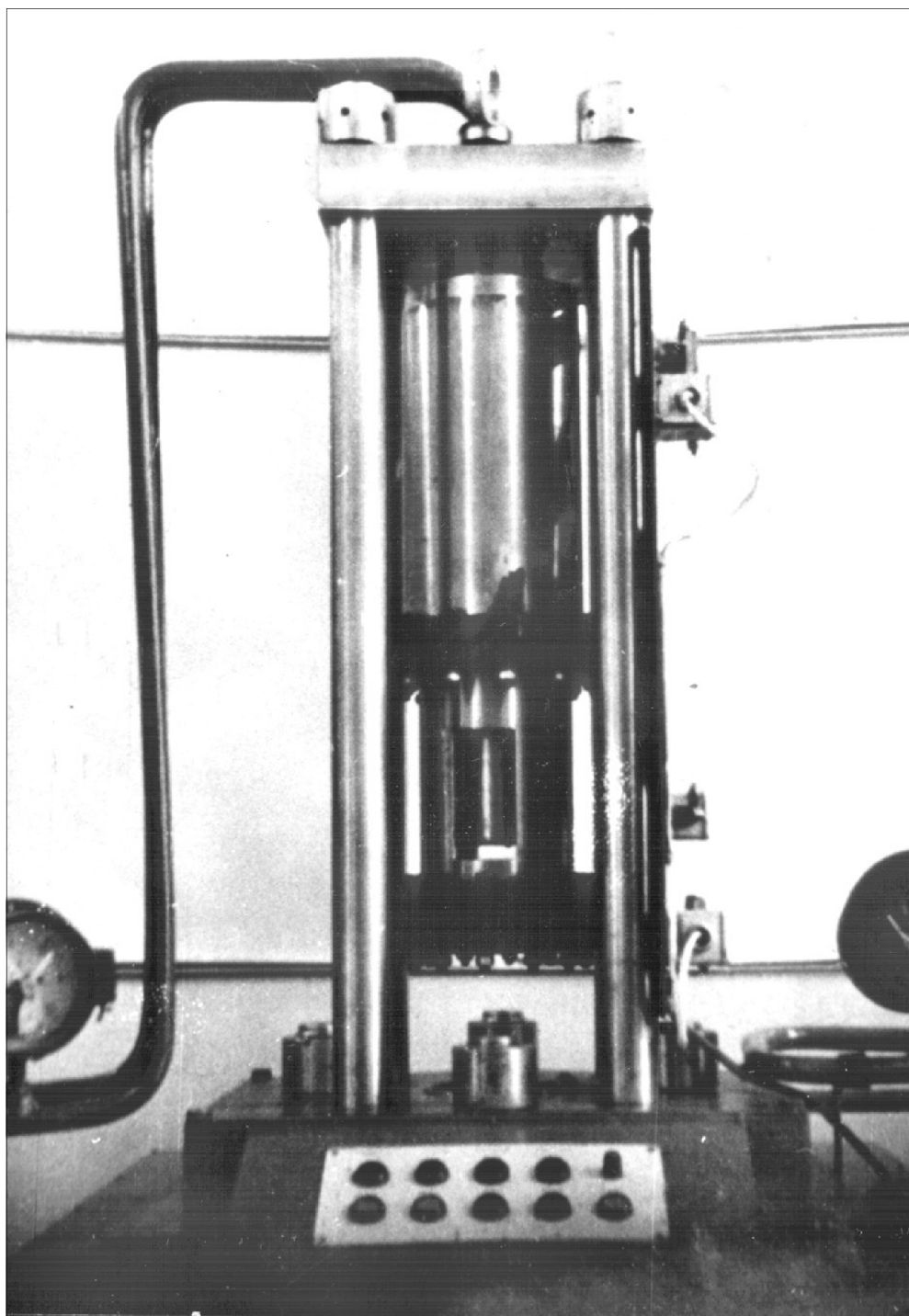


Рис. 15. Верхняя часть пресса для выдавливания  
с активными силами трения

По этому принципу сконструирован другой пресс (рис.16). Масса этого пресса, имеющего силу 1 МН, всего 350 кг. В прессе шток вспомогательного гидроцилиндра 4 яв-

ляется 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.

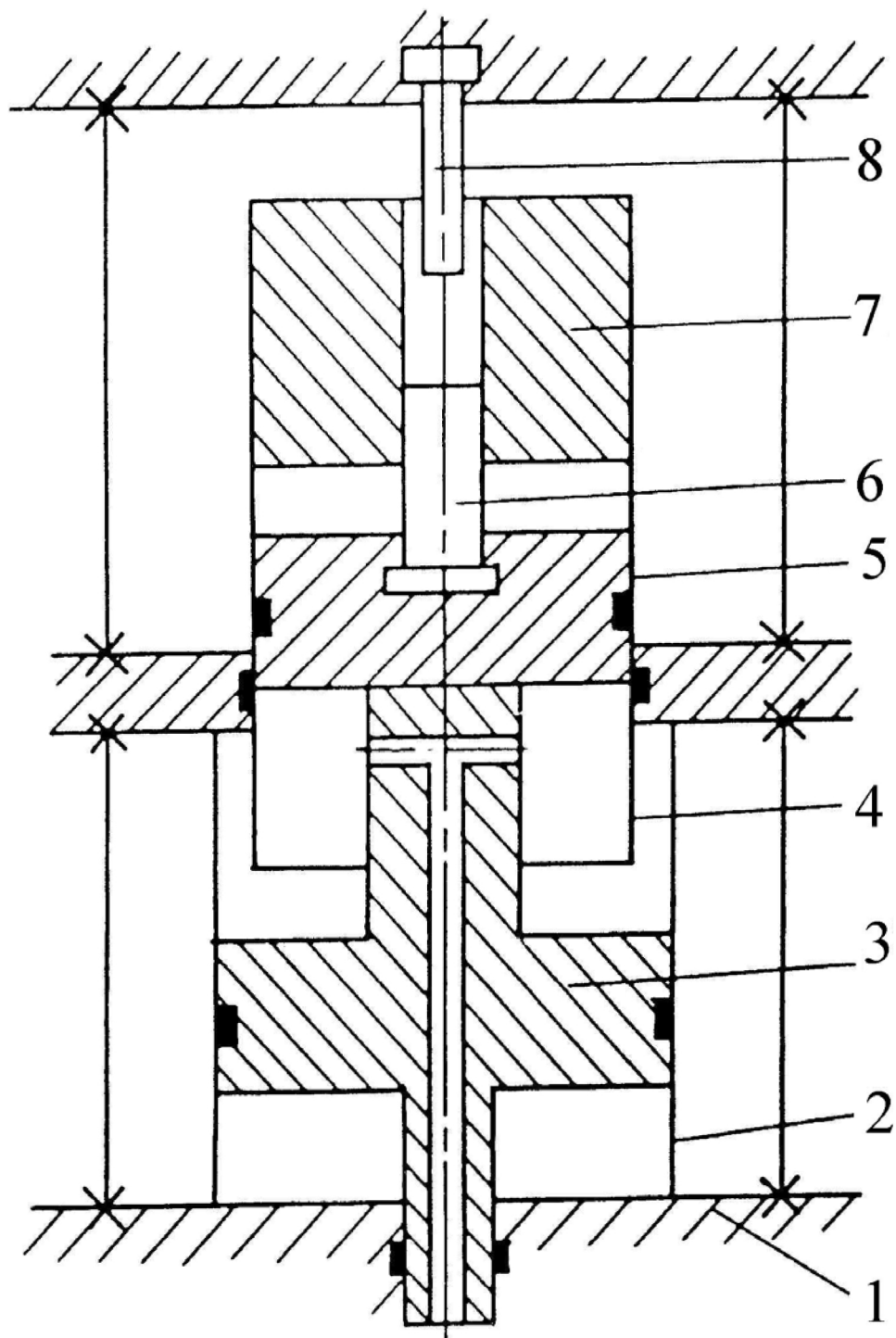


Рис. 16. Конструкция особомалогобаритного пресса для выдавливания с активными силами трения

На описанных прессах отработана технология штамповки сдвоенных втулок, показанных на рис. 17 и 18.

При штамповке по схеме на рис. 17 при создании деформирующей силы пуансоном, перемещаемым со скоростью  $v_n$ , в зависимости от направления перемещения матрицы (на схеме условно обозначено  $v_m = 0$  или 2) можно с помощью сил контактного трения направить течение металла, соответственно, во внутреннюю стенку или во внешнюю стенку детали и регулировать соотношение высот стенок (рис. 18).

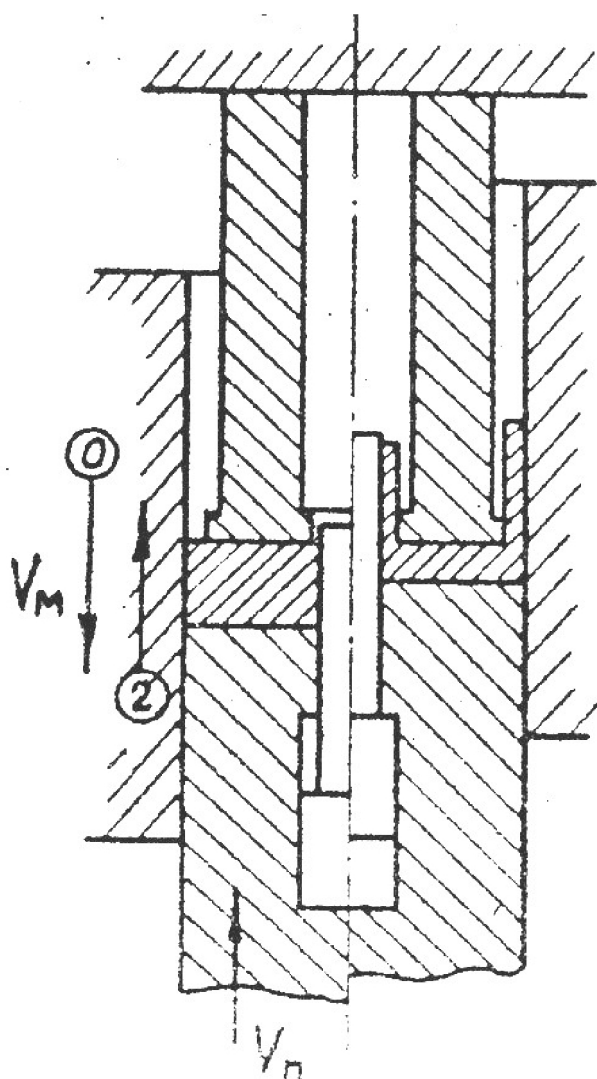


Рис. 17. Схема выдавливания сдвоенных втулок

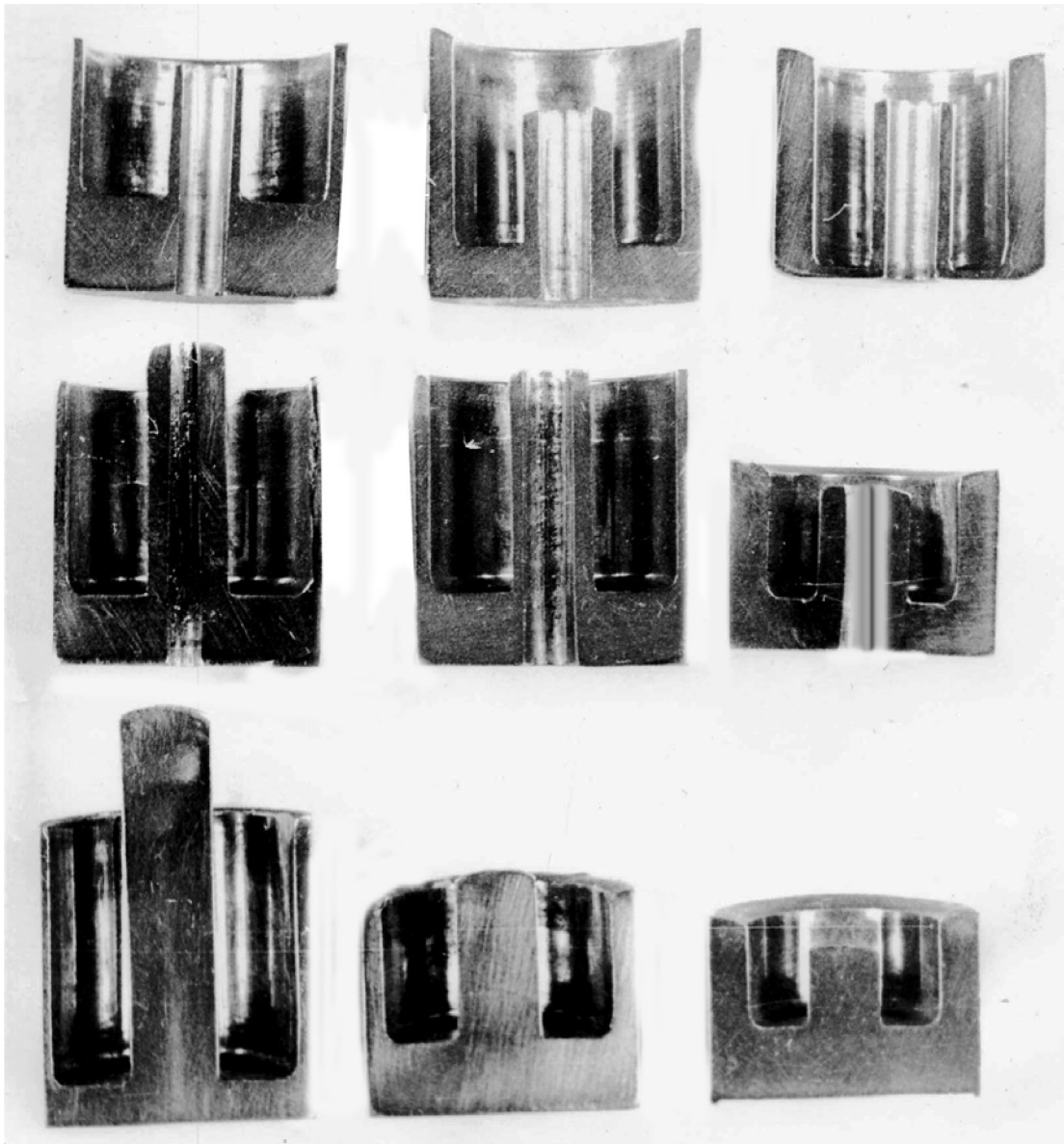


Рис. 18. Втулки из стали 15, изготовленные выдавливанием с использованием сил контактного трения для управления соотношения высот стенок

При этом силы трения также используются для снижения удельной деформирующей силы, что позволяет осуществлять холодное выдавливание деталей даже из легированных сталей (рис.19).

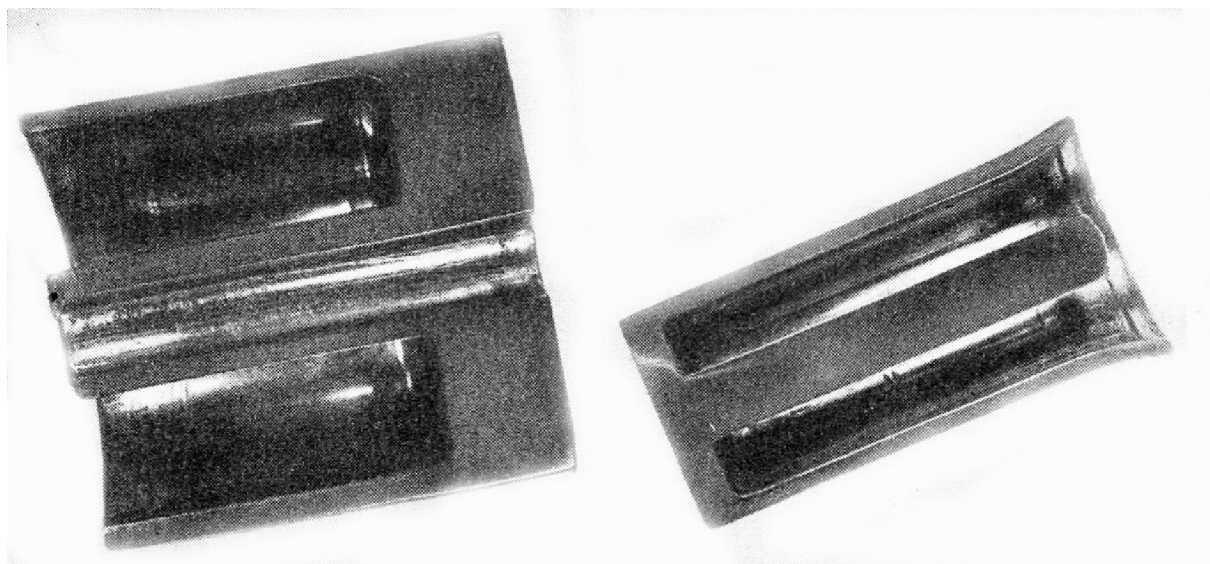


Рис. 19. Втулки, изготовленные холодным выдавливанием  
из стали 20Х

На прессах рассмотренного типа повышается возможность использования, так называемых, компенсационных полостей в штампах (рис. 20) для уменьшения удельных сил, действующих на пуансоны, и создания условий холодного выдавливания легирующих сталей.

На рис. 20 показана схема выдавливания стакана со ступенчатой внешней поверхностью из заготовки, имеющей 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 пе-

редвигают вверх со скоростью  $v_m$ . 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.

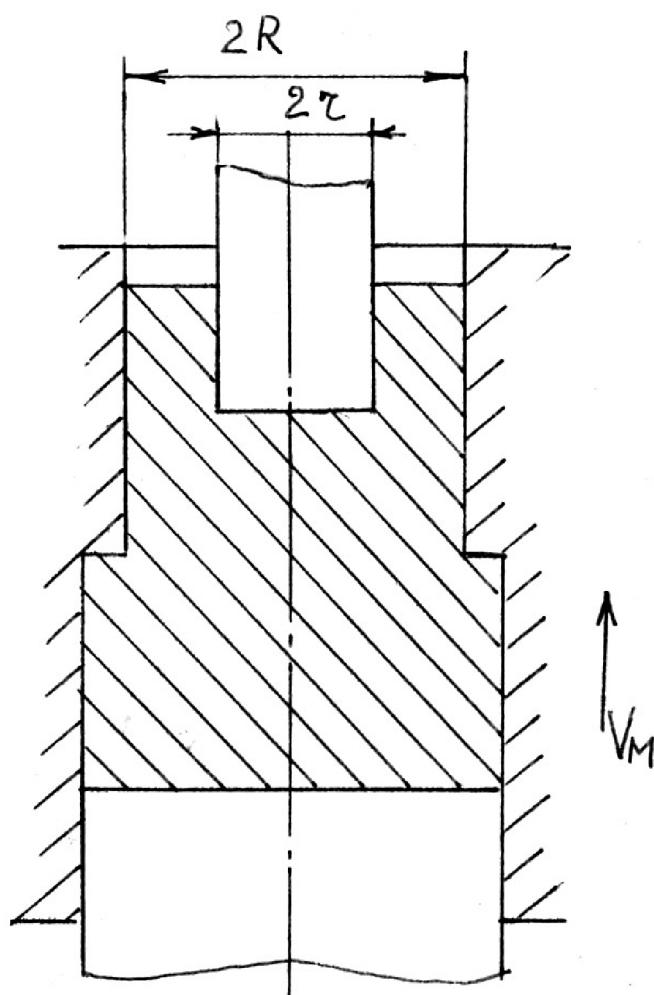


Рис. 20. Схема выдавливания с расширяющейся компенсационной полостью в матрице

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. Производство высококачественных деталей из металлических порошков**

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 , Yoshisuka, 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 [2, 3].

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 прессы 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 доказано, что для получения высокоплотных изделий из железных порошков и порошковых сталей необходимо осуществлять деформирование в условиях, при которых реализуется эффект сдвигов между зернами [4].

Из большого разнообразия процессов изготовления порошковых деталей наибольшей интенсификации производст-

ва позволяют достичь холодное выдавливание деталей из спеченных порошковых заготовок и холодное формование порошка в закрытой матрице с последующим спеканием.

Первый из названных технологических процессов состоит в том, что сначала приготавливают порошковую шихту, в состав которой входит железный порошок, порошок пластификатора (стеарата цинка), предназначенный для снижения трения между отдельными частицами, а также, возможно, порошки легирующих элементов.

Затем заготовку спекают в восстановительной атмосфере, например, в водороде или диссоциированном аммиаке, или в атмосфере, не допускающей окисления, например, в аргоне или азоте.

Прогрессивность описываемых технологии и оборудования заключается в повышении качества деталей, изготовленных холодным выдавливанием из спеченных из железного порошка заготовок, а также в снижении величин удельных сил, действующих на штамповый инструмент. Снижение удельных сил позволяет повысить прочность инструмента и расширить применение технологии на область производства деталей из легированных порошковых материалов.

Удельная сила (т.е. сила, развиваемая прессом, деленная на площадь перпендикулярного направлению перемещения

сечения, деформирующего заготовку инструмента) при холодном выдавливании спеченных заготовок составляет 2500 МПа и более. Для снижения удельной силы проводится выдавливание в штампах, рабочие элементы которых перемещаются относительно друг друга таким образом, что силы трения на поверхности контакта пластически деформируемого материала заготовки с этими элементами инструмента становятся направленными в сторону течения материала и способствуют этому течению. Такие силы трения названы активными силами контактного трения.

На рис. 10 показан пресс, в котором выдавливающий пуансон перемещается плунжером 1. При выдавливании по традиционной схеме силы контактного трения на границе заготовки с матрицей препятствуют течению материала заготовки. Однако, 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.

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

Исходная спеченная заготовка из железного порошка всегда имеет пористость. Рассмотрим выдавливание, например, детали типа стакан из спеченной порошковой заготовки в обычных штампах при реактивном действии контактного трения по матрице.

Когда пуансон только начинает вдавливаться в цилиндрическую исходную заготовку, чтобы образовать в ней полость, заготовка из-за контактного трения не может переместиться в направлении движения пуансона.

Если бы силы трения не препятствовали такому перемещению заготовки, ее высота и, соответственно, пористость, уменьшились бы под действием пуансона. Однако поскольку силы трения препятствуют такому перемещению, заготовка сохраняет имевшуюся у нее пористость, и выдавленный стакан имеет пористую стенку.

Для уменьшения пористости стенки при выдавливании на прессе, показанном на рис. 10, матрицу вначале принудительно перемещают в том же направлении, в каком движется формирующий полость пуансон, создавая силами трения дополнительное препятствие течению материала в стенку стакана, рис. 20, и только после того, как будет исключена пористость заготовки, матрицу направляют в сторону течения материала в стенку стакана, разгружая пуансон при деформировании заготовки.

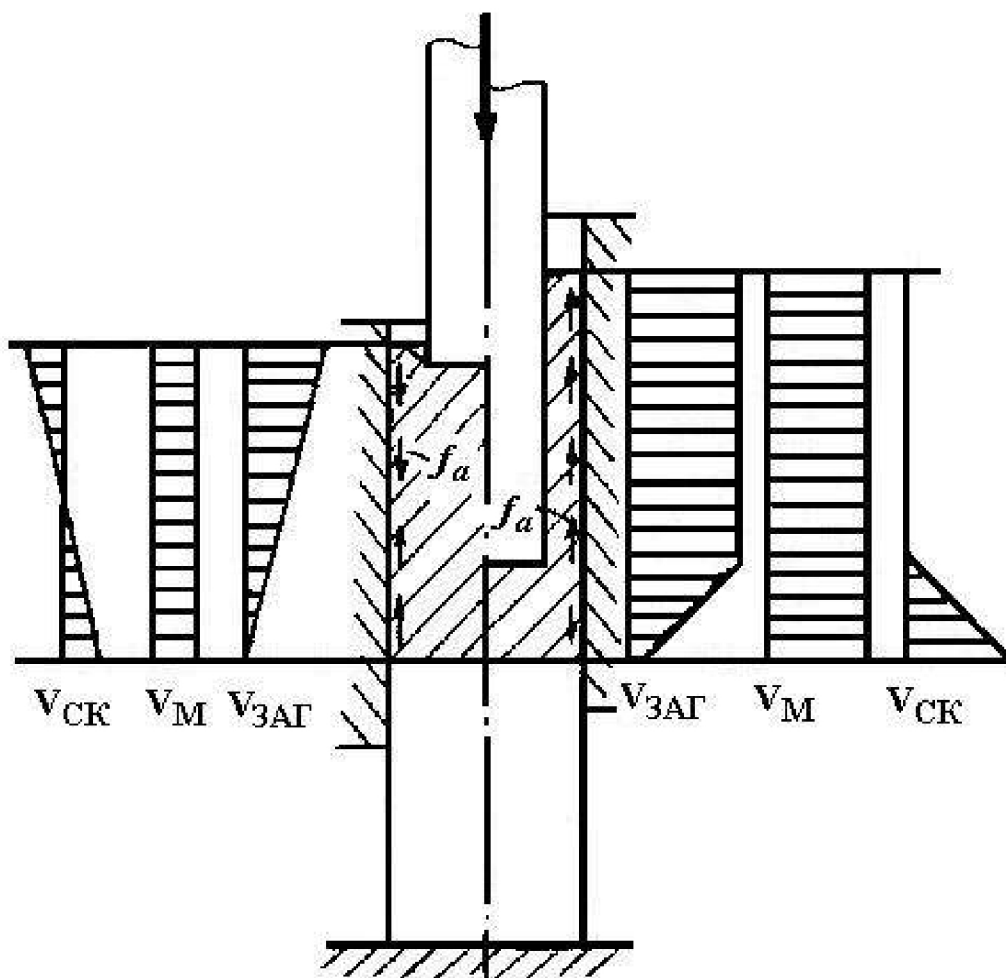


Рис. 20. Выдавливание с активными силами трения стаканов  
из спеченных порошковых заготовок

На рис. 21 видно, что в начале 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 увеличе-

ния 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. 21. Поэтапное формоизменение спеченной порошковой заготовки при выдавливании из нее стакана при активном действии сил трения

В результате получают деталь с высокой равномерной плотностью, рис. 22.

При формировании деталей непосредственно из легированного железного порошка с последующим спеканием необходимы меньшие удельные силы, чем при выдавливании спе-

ченных 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 преимуществ легирования.



Рис. 22. Стаканы, изготовленные выдавливанием из спеченных порошковых заготовок

Для получения высокоплотных деталей непосредственно из порошковой шихты необходимо осуществлять деформиро-

вание в условиях, при которых в заготовке происходят интенсивные сдвиги между частицами. 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.

Достигается это при совмещении уплотнения давлением всестороннего сжатия со сдвигом частиц относительно друг друга.

Для формования порошковой детали со сдвигом частиц относительно друг друга применяют штампы, конструкция которых схематично представлена на рис. 23.

В этих штампах деталь 2 формуют в матрице 1. Пуансон 3 совершает винтовое движение: перемещается поступательно и одновременно поворачивается благодаря наличию в его приводе пары винт 5 – гайка 4 с резьбой, имеющей такой шаг, который исключает заклинивание при осевой нагрузке. С помощью этого штампа возможно осуществлять различные соотношения поступательного и вращательного движений пуансона 3, имея лишь одну пару винт – гайка с неизменным шагом резьбы.

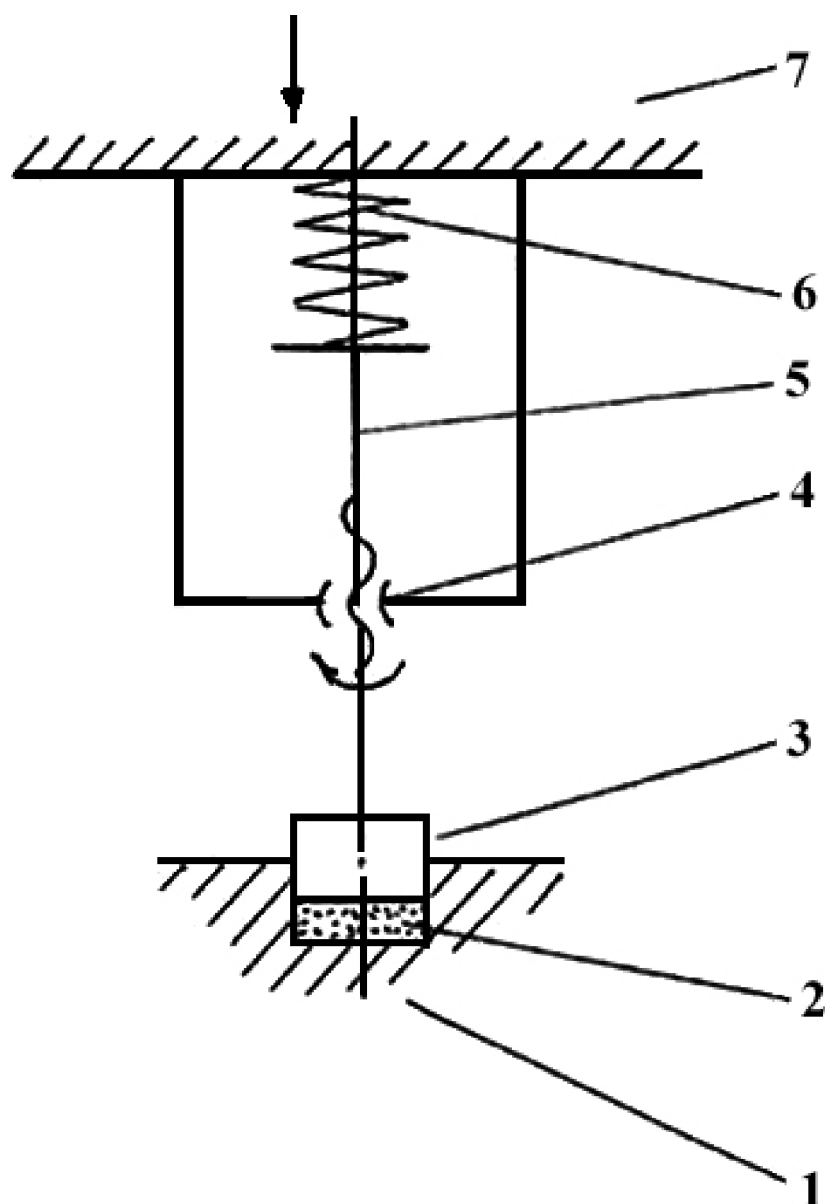


Рис. 23. Схема штампа для формования порошковой детали со сдвигом частиц

Это достигается выбором жесткости упругого элемента 6 между верхним торцом винта 5 и плитой 7, которой штамп соединен с ползуном прессы. При бесконечной жесткости пуансон будет совершать только поступательное движение, а при нулевой жесткости – в основном вращательное.

На рис. 24 приведена конструкция штампа, позволяющая при использовании лишь одной пары винт – гайка с несамотормозящей резьбой получать винтовое перемещение пуансона с различными углами подъема.

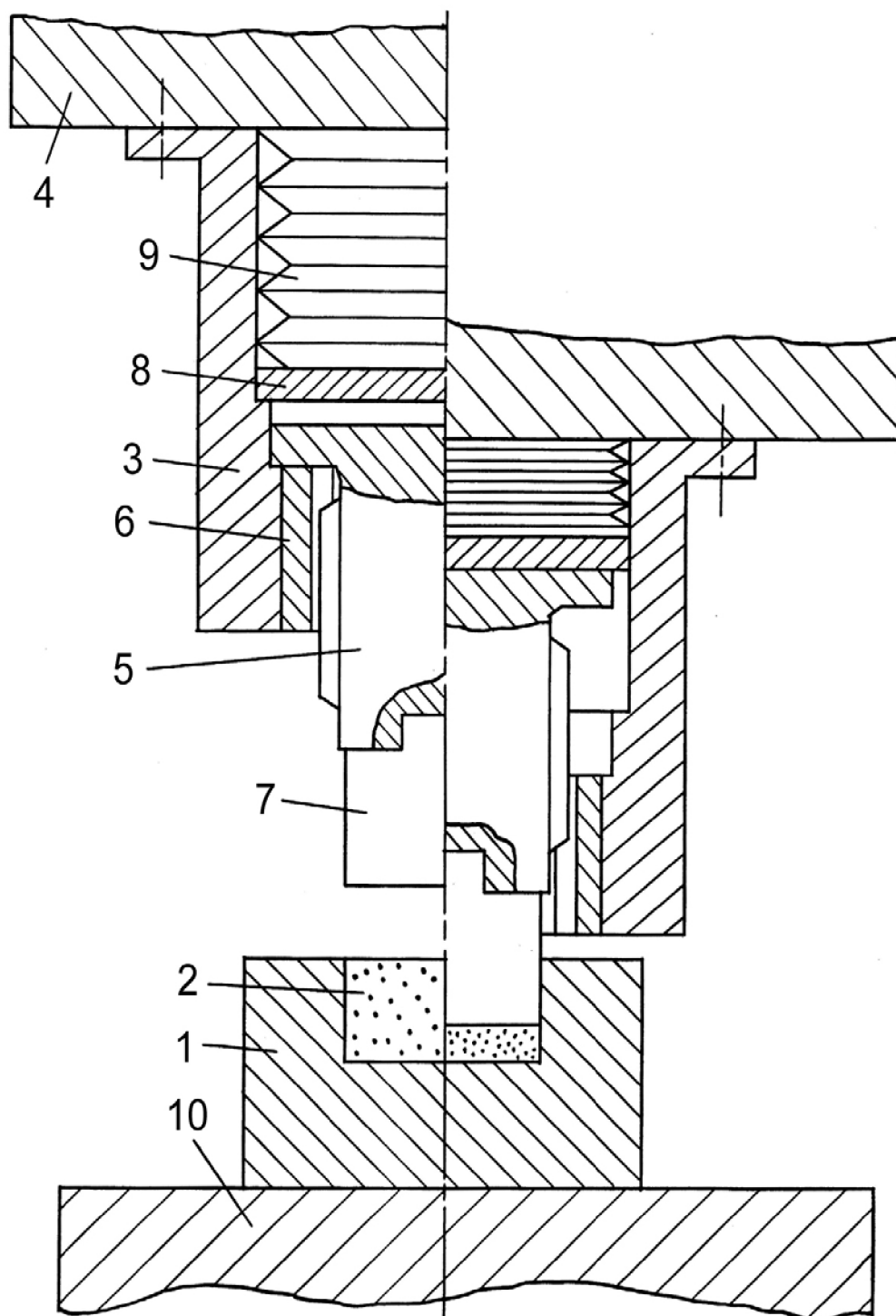


Рис. 24. Конструкция штампа для уплотнения заготовки поворачивающимся пуансоном

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 формирование 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 формирование осуществляется при осевом перемещении пуансона 7 с одновременным его вращением.

При этом соотношение вращательного и поступательного перемещений пуансона 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.

По окончании формирования 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 (рис. 25) 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.

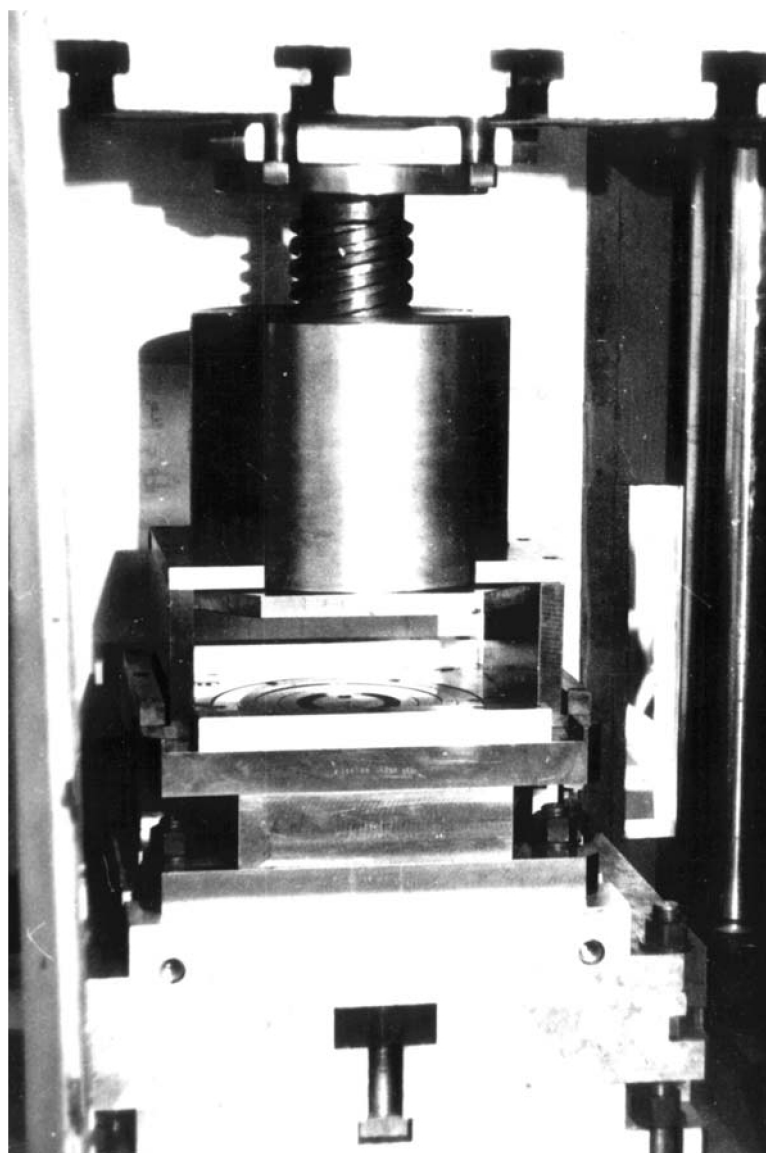


Рис. 25. Штамп для формования порошковых деталей  
поворачиваемым пуансоном

В развитие способов формирования порошковых заготовок при создании активных сдвигов между частицами заготовки предложена схема, приведенная на рис. 26. Формование по этой схеме осуществляется с помощью штампа, описанного в разделе 1 и показанного на рис. 3.

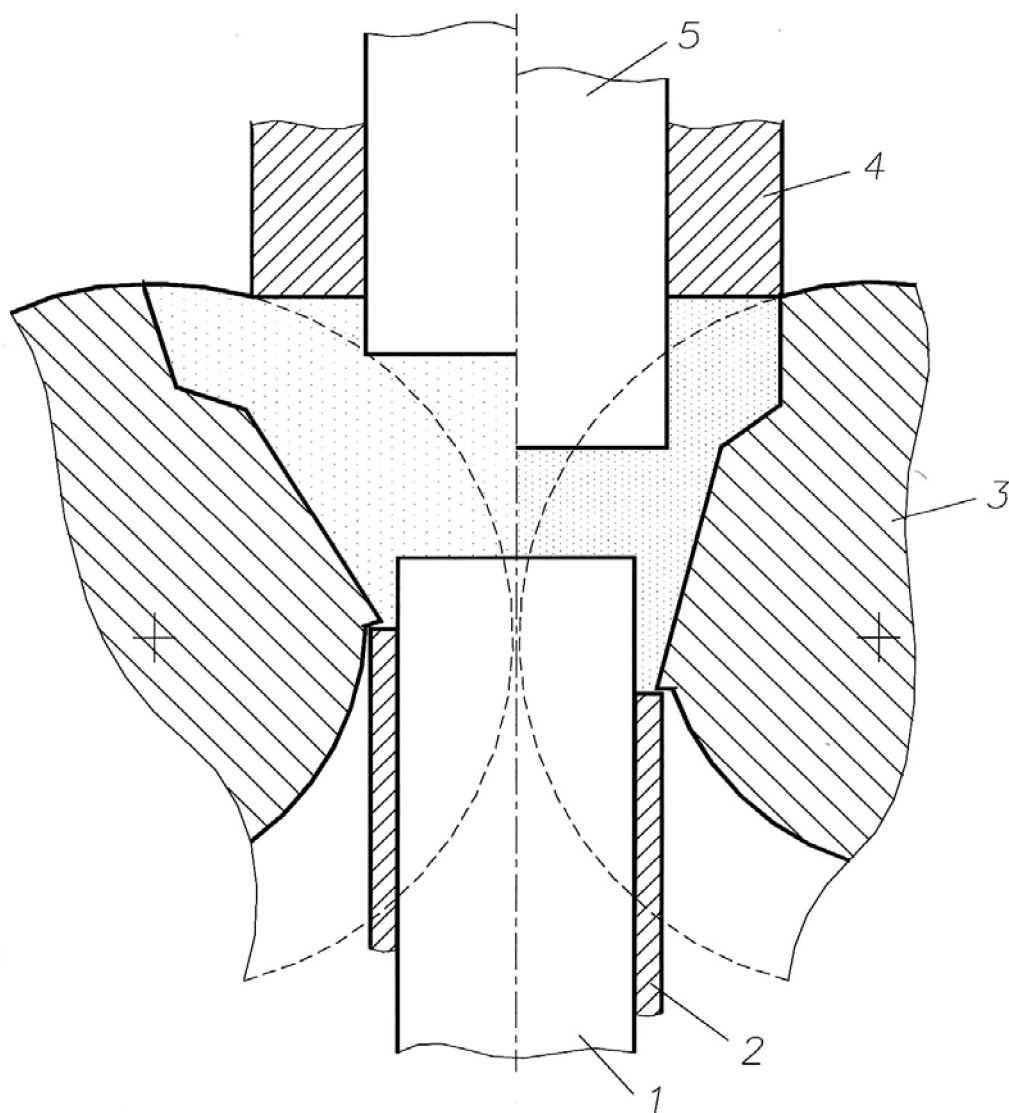


Рис. 26. Формование порошковой заготовки в матрице, образованной вальцами

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 прессы 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 формирует нижний торец детали, а втулочный пуансон 4 – верхний торец.

Формование высокоплотных деталей со сдвигом частиц может проводиться на прессах для выдавливания с активными силами контактного трения, конструкция которых представлена на рис. 10, 12, 13, 16.

Формование осевым сжатием с одновременным созданием в заготовке сдвигов слоев материала осуществляется на этих прессах по схеме, приведенной на рис. 27.

На первом этапе (рис. 27, а) осуществляется уплотнение порошка движением пуансона со скоростью  $v_n$  с одновременной раздачей заготовки путем перемещения матрицы, имеющей ступенчатую рабочую полость, навстречу пуансону со скоростью  $v_m$ .

При раздаче создаются сдвиги слоев материала заготовки. На втором этапе (рис. 27, б) осуществляется обжим брикета

по боковой поверхности перемещением матрицы со скоростью  $v_m$  при воздействии силой  $P_n$  со стороны верхнего пуансона.

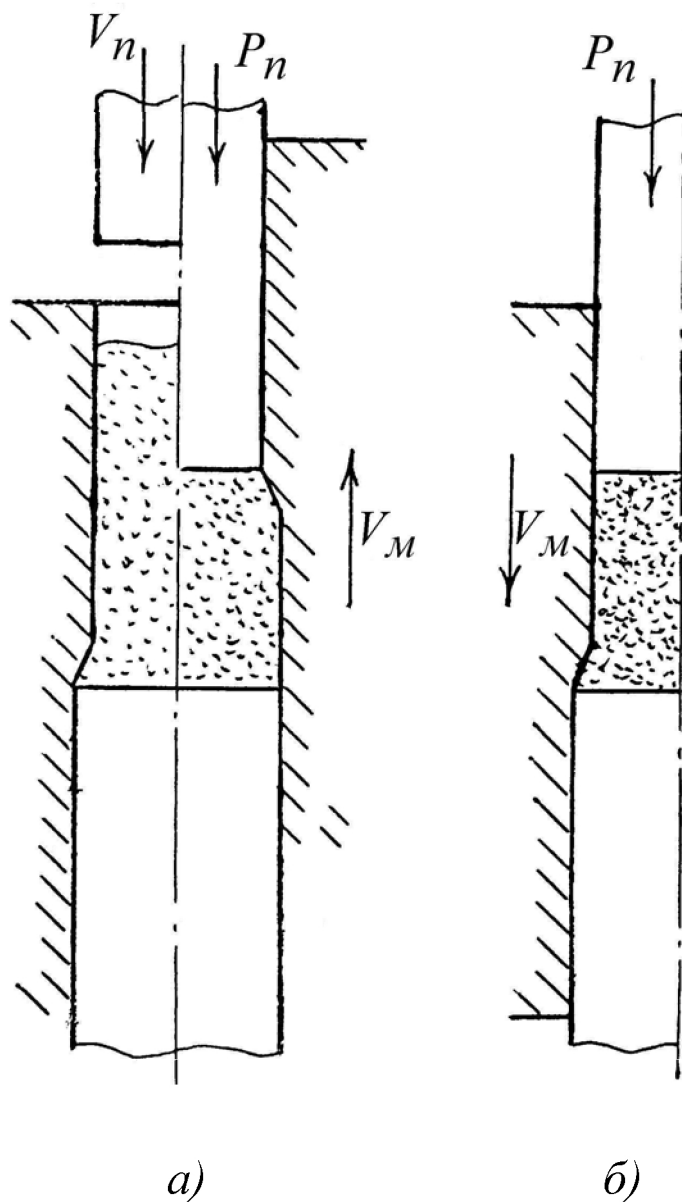


Рис. 27. Схема формирования порошковой заготовки осевым сжатием с созданием сдвигов слоев материала

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

Конструкция наиболее компактного и многофункционального из прессов для рассмотренных технологий схематично изображена на рис. 28.

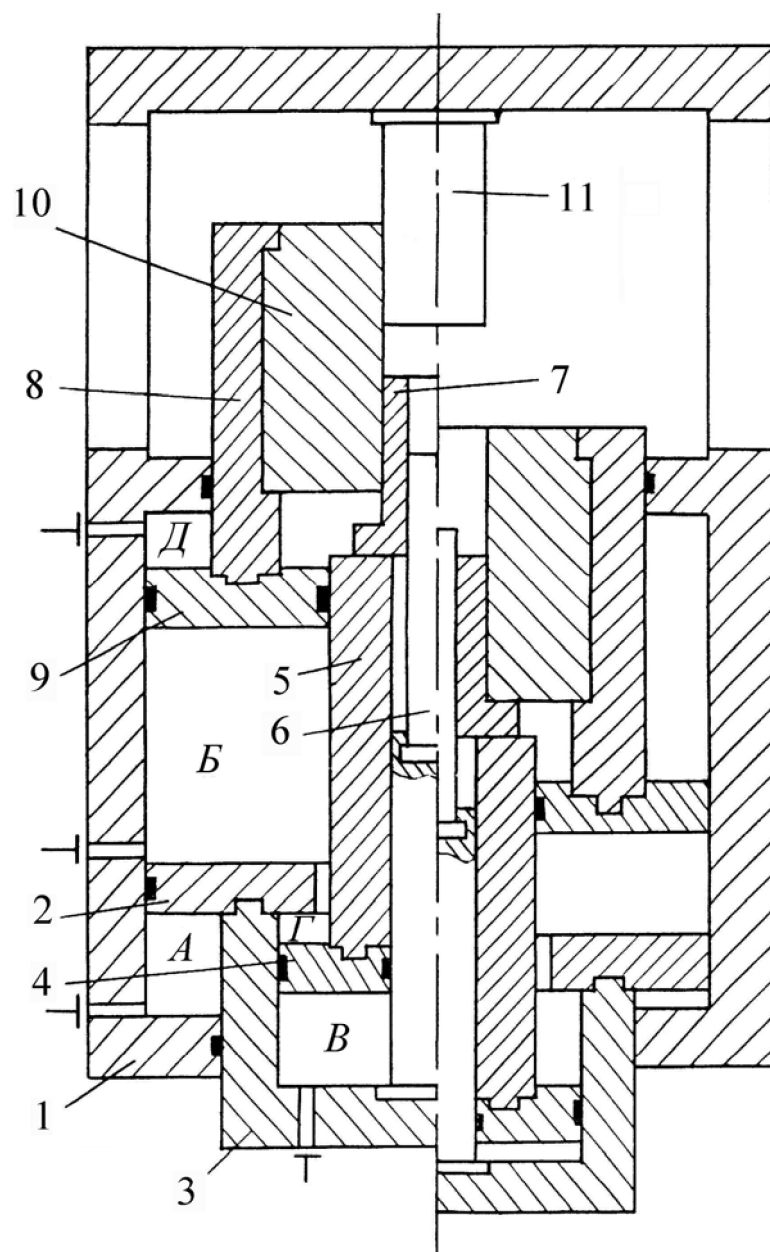


Рис. 28. Компактный многофункциональный гидропресс

Этот пресс, кроме холодного выдавливания с активными силами трения, предназначен для формования высокоплот-

ных 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, формирующей полость в заготовке. Матрица находится в нижнем положении (рис. 28 – правая половина).

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 формируемого стакана. После окончания уплотнения стенки по-

дают рабочую жидкость в полость *Д*, при этом полость *Б* соединяют со сливом, а входы в полости *А* и *В* закрыты. При этом матрица перемещается вниз и активными силами контактного трения дополнительно уплотняет стенку формируемого 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 *б* и *в* 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. 10, 12, 13, 16, малые габариты прессов недостаточно ощущаются из-за массивных гидроприводов (см. рис. 14).

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. 29).

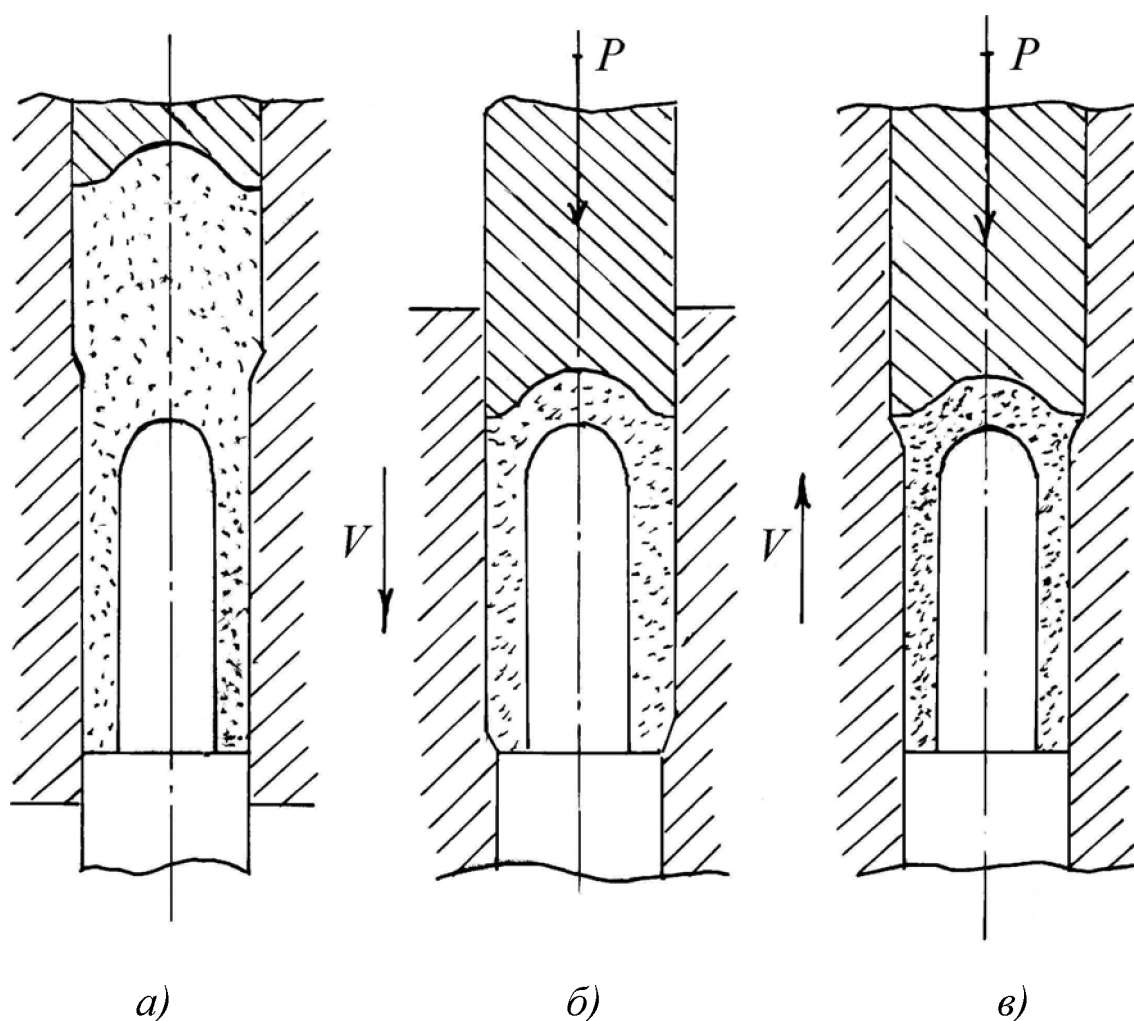


Рис. 29. Схема формования стаканов с созданием интенсивных сдвигов в материале порошковой заготовки

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. 29, а), при этом засыпную полость образует участок большего диаметра, а силы трения на поверхности контакта порошка с матрицей способ-

ствуют заполнению полости матрицы. После окончания за-  
сыпки порошка и предварительного его уплотнения верхним  
пуансоном осуществляется движение матрицы вверх (рис. 29,  
б), при этом сформованный на первом этапе стакан переме-  
щается в участок полости матрицы меньшего диаметра. В ре-  
зультате происходит дополнительное уплотнение стенок ста-  
кана (рис. 29, в). На донную часть заготовки постоянно  
действует сила, создаваемая верхним пуансоном.

Ниже приведены фотографии (рис. 30, 31) некоторых де-  
талей, изготовленных на созданных, описанных выше, прес-  
сах с использованием описанных схем деформирования.

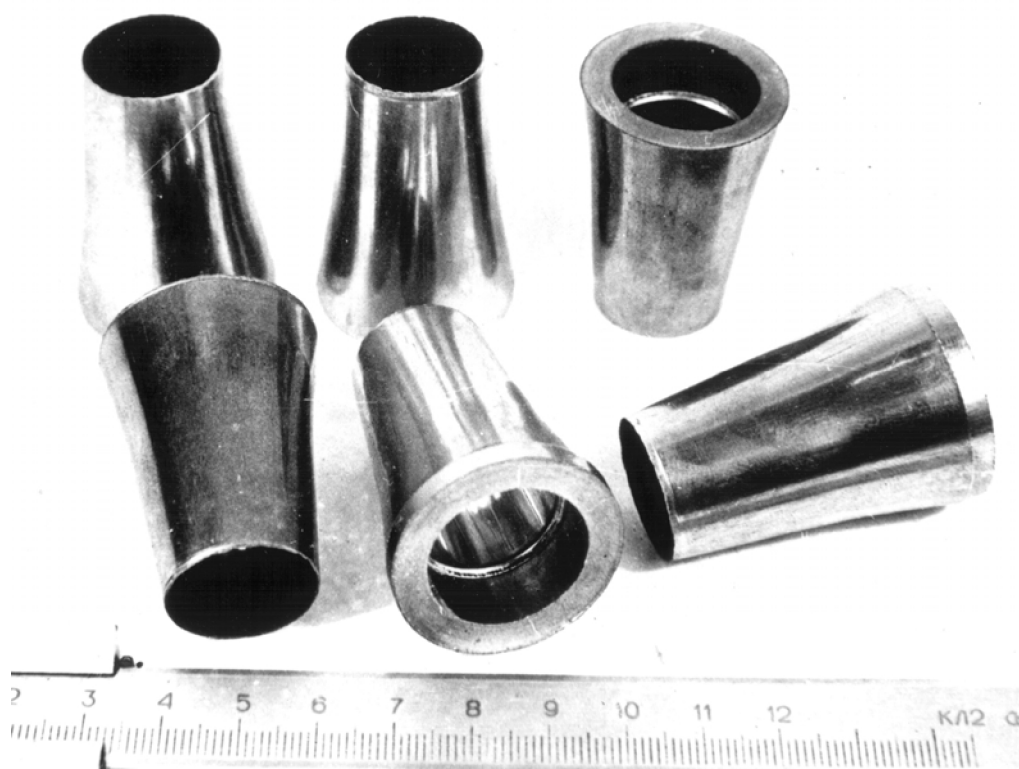


Рис. 30. Порошковые втулки с тонкой стенкой из ПЖВ2.160.28



Рис. 31. Порошковые втулки со ступенчатой фланцевой частью  
из ПЖРВ3.160.24

### **3.3. 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 [5].

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 формованием порошков. Коэффициент объемно-

го термического расширения увеличивается с уменьшением размера зерна. Коэффициент граничной диффузии в наноматериалах значительно выше, чем в крупнозернистых, что позволяет легировать их нерастворимыми или слабо растворимыми 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 [6, 7].

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 металлосведов, то в их работах по технологии наноматериалов ключевую позицию заняли методы интен-

сивной 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 [8, 9]. Во-вторых, у обработчиков давлением создано и работает в промышленности оборудование для реализации этих методов [10].

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 [11].

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. 13. Эта схема имеет существенные пре-

имущества 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 в настоящем издании.

## **4. АНАЛИЗ ШТАМПОВКИ ВЫСОКОПЛОТНЫХ ПОРОШКОВЫХ ДЕТАЛЕЙ**

### **4.1. Оценка погрешности в описании кинематики течения при отказе от учета сжимаемости заготовки**

Анализ кинематического и напряженного состояний порошковой заготовки отличается от анализа сплошной учетом сжимаемости материала.

В то же время, если целью анализа напряженного состояния является определение необходимой для штамповки силы прессы или расчет на прочность штампового инструмента, рассматривается конечный момент штамповки, когда сила максимальна. Современные механические схемы приложения деформирующих сил к пористой заготовке позволяют обеспечить плотность детали 95 % и выше как при штамповке предварительно спеченных заготовок, так и непосредственно порошка. В этом случае учет сжимаемости материала имеет в большей степени теоретическое значение, чем практически влияет на кинематику течения и напряженное состояние порошковой заготовки.

С целью оценки погрешности, имеющей место при применении результатов исследования кинематического состояния при штамповке несжимаемых заготовок, для описания

кинематического состояния при штамповке порошковых заготовок с пористостью 13...15 % проведен следующий эксперимент.

Исследовано распределение интенсивности скоростей деформаций в зависимости от материала заготовки  $X_1$ , глубины внедрения пуансона  $X_2$  (отнесенной к его диаметру), исходной координаты по горизонтали точки на меридиональном сечении заготовки  $X_3$  (отнесенной к диаметру заготовки), исходной координаты точки по вертикали  $X_4$  (отнесенной к диаметру заготовки). Центр координат располагался на оси заготовки на верхнем торце.

Деформировали разрезные цилиндрические образцы с начальной высотой и диаметром, равными 30 мм, из алюминиевого сплава АВ и изготовленные формованием и спеканием из железного порошка ПЖВ4.160.28. Диаметр полости матрицы составлял 30 мм, диаметр пуансона – 20 мм. На поверхность меридионального разреза образцов была нанесена квадратная делительная сетка с шагом 1,5 мм. Компоненты тензора скоростей деформаций определяли по искаженной сетке на основании известных соотношений. Принята следующая математическая модель, коэффициенты которой определяли в результате эксперимента:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i X_i + \sum_{i=3}^4 b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=3}^4 b_{iii} X_i^3. \quad (4.1)$$

Матрица плана эксперимента в натуральном масштабе представлена в табл. 1.

Таблица 1. Значения факторов плана эксперимента  $2^2 \times 4^2 // 16$   
в натуральном масштабе

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	АВ	0,25	0,1	0,15
2	ПЖВ4.160.28	0,25	0,3	0,3
3	АВ	0,25	0,4	0,6
4	ПЖВ4.160.28	0,25	0,2	0,45
5	АВ	0,5	0,3	0,6
6	ПЖВ4.160.28	0,5	0,1	0,45
7	АВ	0,5	0,2	0,15
8	ПЖВ4.160.28	0,5	0,4	0,3
9	АВ	0,25	0,4	0,45
10	ПЖВ4.160.28	0,25	0,2	0,6
11	АВ	0,25	0,1	0,3
12	ПЖВ4.160.28	0,25	0,3	0,15
13	АВ	0,5	0,2	0,3
14	ПЖВ4.160.28	0,5	0,4	0,15
15	АВ	0,5	0,3	0,45
16	ПЖВ4.160.28	0,5	0,1	0,6

Расположение ячеек делительной сетки, в которых рассчитывали интенсивность скоростей деформаций, показано на рис. 32.

Для обработки данных эксперимента сделан переход к кодированному масштабу. Модель в кодированных обозначениях факторов принимает вид

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i=3}^4 b_{ii} z_i + \sum_{i=3}^4 b_{iii} q_i,$$

где  $x_i$  – линейная функция от  $X_i$ ;

$z_i$  – квадратичная функция от  $x_i$ ;

$q_i$  – кубическая функция от  $x_i$ .

Переход от натуральных значений факторов к кодированным осуществляется по формулам:

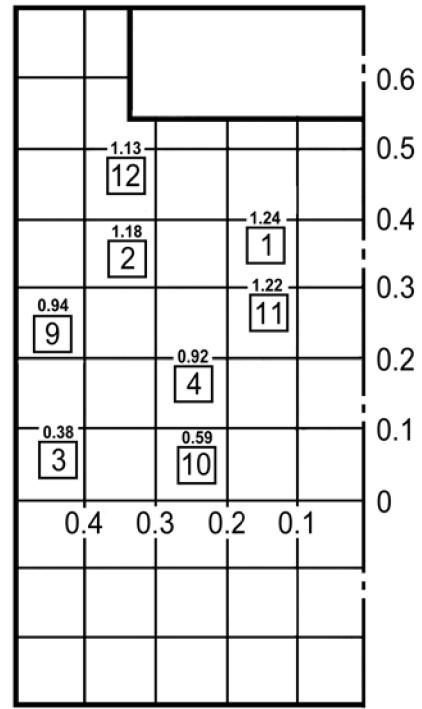
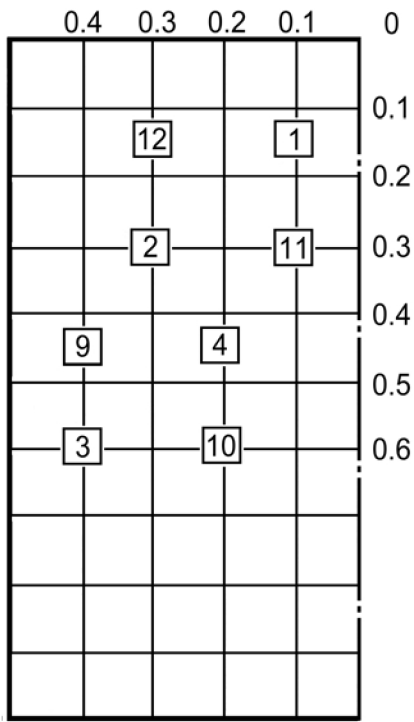
$$x_1 = 2(X_1 - 0,5); \quad x_2 = 8(X_2 - 3,75);$$

$$x_3 = 6,66(X_3 - 0,25); \quad x_4 = 4(X_4 - 0,375);$$

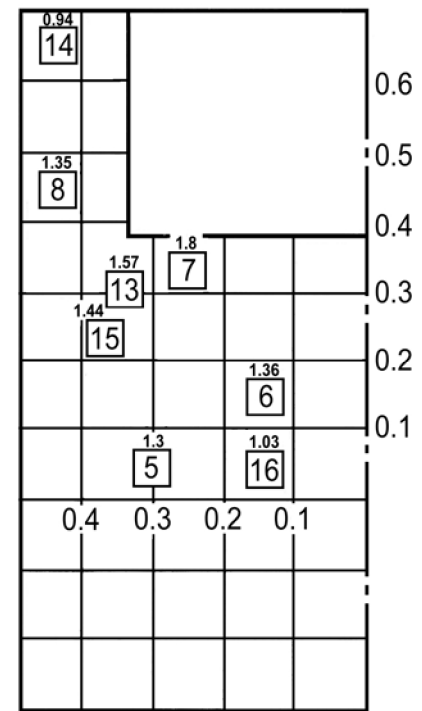
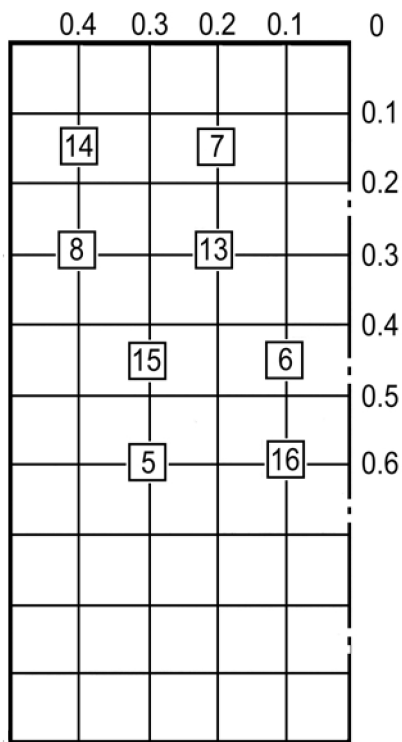
$$z_3 = x_3^2 - 0,555; \quad z_4 = 1,11(x_4^2 - 0,45);$$

$$q_3 = x_3^3 - 0,911; \quad q_4 = 1,11(x_4^3 - 0,738).$$

Эти формулы определены из условия получения ортогональной матрицы плана эксперимента в кодированном масштабе, табл. 2.



а)



б)

Рис. 32. Расположение входящих в опыты матрицы плана (табл. 1) ячеек делительной сетки (слева) и перемещение ячеек при выдавливании: а – глубина внедрения пуансона равна  $1/4$  его диаметра; б – глубина внедрения пуансона равна  $1/2$  его диаметра

Таблица 2. Матрица плана и результаты эксперимента

№ строки	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$z_3$
1	1	-1	-1	-1	-0,9	0,445
2	1	1	-1	0,333	0,3	-0,445
3	1	-1	-1	1	0,9	0,445
4	1	1	-1	-0,333	-0,3	-0,445
5	1	-1	1	0,333	0,9	-0,445
6	1	1	1	-1	-0,3	0,445
7	1	-1	1	-0,333	-0,9	-0,445
8	1	1	1	1	0,3	0,445
9	1	-1	-1	1	0,3	0,445
10	1	1	-1	-0,333	0,9	-0,445
11	1	-1	-1	-1	-0,3	0,445
12	1	1	-1	0,333	-0,9	-0,445
13	1	-1	1	-0,333	-0,3	-0,445
14	1	1	1	1	-0,9	0,445
15	1	-1	1	0,333	0,3	-0,445
16	1	1	1	-1	0,9	0,445

№ строки	$z_4$	$q_3$	$q_4$	Координаты точки после выдав- ливания		$\xi_i$
				$r$	$z$	
1	0,4	-0,089	-0,072	0,12	0,39	1,24
2	-0,4	-0,266	0,216	0,32	0,32	1,18
3	0,4	0,089	0,072	0,41	0,06	0,38
4	-0,4	0,266	-0,216	0,22	0,16	0,92
5	0,4	-0,266	0,072	0,31	0,07	1,30
6	-0,4	-0,089	-0,216	0,14	0,11	1,36
7	0,4	0,266	-0,072	0,29	0,31	1,80
8	-0,4	0,089	0,216	0,44	0,44	1,35
9	-0,4	0,089	-0,216	0,42	0,21	0,94
10	0,4	0,266	0,072	0,21	0,05	0,59
11	-0,4	-0,089	0,216	0,12	0,29	1,22
12	0,4	-0,266	-0,072	0,35	0,46	1,13
13	-0,4	0,266	0,216	0,32	0,30	1,58
14	0,4	0,089	-0,072	0,43	0,62	0,94
15	-0,4	-0,266	-0,216	0,36	0,23	1,44
16	0,4	-0,089	0,072	0,11	0,03	1,03

Поскольку матрица плана эксперимента в кодированном масштабе ортогональна, коэффициенты модели рассчитывались по формуле

$$b_i = \left( \sum_{u=1}^N x_{i_u} y_u \right) / \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2,$$

где  $u$  – номер опыта.

Получено следующее уравнение регрессии:

$$y = 1,15 - 0,07x_1 + 0,2x_2 - 0,134x_3 + 0,233x_4 - 0,2z_3 - 0,246z_4 - 0,24q_3 + 0,236q_4. \quad (4.2)$$

После перехода к натуральным значениям факторов уравнение (4.2) приняло вид

$$\xi_i = 0,414 - 0,14X_1 + 1,6X_2 - 8,31X_3 + 8,66X_4 + 44,4X_3^2 - 23,3X_4^2 - 71,1X_3^3 + 16,8X_4^3. \quad (4.3)$$

Более удобной, чем формула (4.3), при расчете технологических процессов выдавливания является формула, позволяющая рассчитать интенсивность деформации в зависимости от координат точки детали после выдавливания, которые для использованного плана записаны в табл. 2. Для этих координат уравнения (4.2) и (4.3) преобразуются соответственно в следующие уравнения:

$$y = 1,15 - 0,07x_1 + 0,2x_2 - 0,047x_3 + 0,196x_4 - 0,036z_3 - \\ - 0,165z_4 - 0,029q_3 - 0,133q_4; \quad (4.4)$$

$$\xi_i = -0,475 - 0,14X_1 + 16h + 1,445r + 3,96z + \\ + 14,1r^2 + 3,79z^2 - 38,9r^3 - 17,5z^3. \quad (4.5)$$

В уравнениях (4.3) и (4.5)  $X_1 = 0$  при выдавливании несжимаемой заготовки,  $X_1 = 1$ , если заготовка имеет пористость 13...15 %.

Анализ моделей (4.3) и (4.5) показывает, что сжимаемость заготовки (член, содержащий  $X_1$ ) оказывает наименьшее влияние, по сравнению с другими членами, на величину интенсивности скоростей деформации в различных точках детали. Сопоставление значения коэффициента перед  $X_1$  со средним арифметическим значением интенсивности скоростей деформаций в исследованных точках деталей показывает, что ошибка при неучете сжимаемости заготовки в расчетах интенсивности скоростей деформаций при выдавливании не превышает 12 %.

Заметим, что мы исследовали начальную стадию выдавливания стакана, когда глубина полости составляла 0,25...0,5 ее диаметра. При выдавливании более глубоких полостей рез-

ко снижается точность замеров искаженной координатной сетки на меридиональном сечении заготовок.

В то же время по мере увеличения глубины полости плотность выдавливаемой заготовки возрастает. При холодном выдавливании стаканов из спеченных заготовок с исходной пористостью 13...15 % средняя плотность выдавленных стаканов 97...98 %, а плотность в донной части, т.е. в очаге пластической деформации на заключительной стадии выдавливания, почти 100 %.

Результаты исследования и приведенные комментарии позволяют рекомендовать использовать результаты анализа кинематического состояния при штамповке сплошных заготовок в инженерных расчетах процессов штамповки деталей из заготовок с небольшой пористостью. Это позволяет также допустить использование условия несжимаемости при выборе кинематических функций для описания скоростей течения.

#### **4.2. Определение условного напряжения текучести порошковой заготовки**

Для порошковой заготовки понятие напряжения текучести не применялось. В условиях пластичности пористых тел используют напряжение текучести материала основы.

В то же время, для возможности применения математических выражений, полученных для анализа деформирования сплошных заготовок, к анализу деформирования высокоплотных порошковых заготовок целесообразно ввести понятие условного напряжения текучести порошковой заготовки.

Ниже изложена методика, позволяющая определить условное напряжение текучести порошковой заготовки с учетом реальных свойств исследуемого порошка на основании данных по формованию в закрытой матрице.

Для анализа напряжений в порошковой заготовке, имеющей высокую плотность, допустив, что она более не уплотняется под действием гидростатического давления, можно использовать критерий пластичности беспористого материала Губера – Мизеса, записав его в цилиндрических координатах в виде

$$(1/2)\left[(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\rho)^2 + 6(\tau_{\rho\theta}^2 + \tau_{\theta z}^2 + \tau_{\rho z}^2)\right] = (\sigma_{s0})^2. \quad (4.6)$$

Входящую в правую часть равенства (4.6) величину  $\sigma_{s0}$ , на месте которой в теории пластичности беспористого материала стоит напряжение текучести  $\sigma_s$ , назовем условным напряжением текучести порошковой заготовки.

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 для пористого материала (4.6) при формовании цилиндрических образцов запишем в виде

$$\sigma_{\rho}^2 - \sigma_{\rho}\sigma_z + \sigma_z^2 + 3\tau_{\rho z}^2 = \sigma_{s0}^2\varphi^2, \quad (4.7)$$

где  $\sigma_\rho$ ,  $\sigma_z$  – нормальные напряжения,

$\tau_{\rho z}$  – касательное напряжение,

$\sigma_{s0}$  – напряжение текучести твердой фазы пористого материала,

$\varphi = \varphi(\Pi, \sigma_0)$  – функция пористости и среднего нормального напряжения.

Уравнения связи между деформациями и напряжениями имеют вид

$$\left. \begin{aligned} d\xi_\rho &= d\lambda[3(\sigma_\rho - \sigma_0) - (2/3)\sigma_{s0}^2 (\partial/\partial\sigma_0)]; \\ d\xi_z &= d\lambda[3(\sigma_z - \sigma_0) - (2/3)\sigma_{s0}^2 (\partial/\partial\sigma_0)]; \\ d\gamma_{\rho z} &= 3d\lambda\tau_{\rho z}, \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

где  $d\lambda$  – неопределенный множитель Лагранжа.

При формовании в закрытой матрице имеет место только осевая деформация, радиальное перемещение материала отсутствует, это подтверждается следующим экспериментом (рис. 33).

В матрицу перед засыпкой порошка поместили формочку из папиросной бумаги. Она представляла собой цилиндр с одним доньшком, полость которого была разделена на концентрические цилиндры формочками меньшего диаметра.

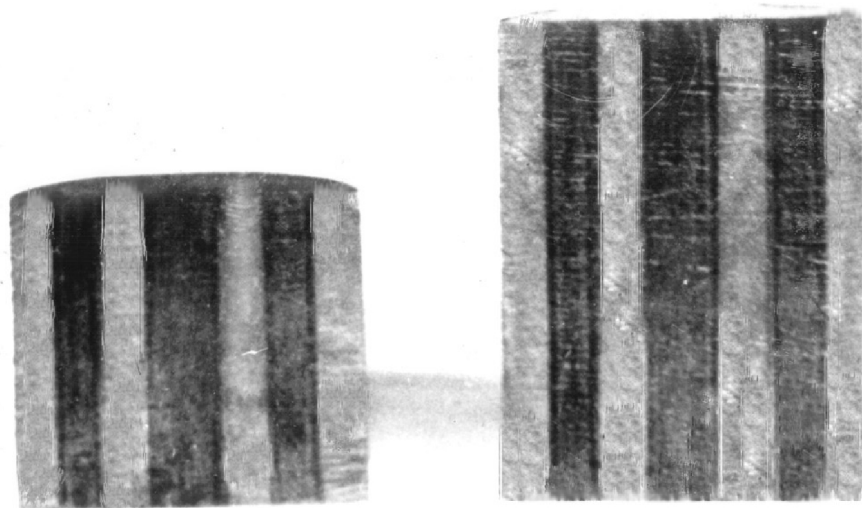


Рис. 33. Уплотнение многослойной порошковой заготовки при формовании в закрытой матрице: справа – начало уплотнения, слева – окончание

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.

Поскольку деформация  $\xi_\theta$  также равна 0, то из (4.8) следует, что  $\sigma_\rho = \sigma_\theta$ . Поэтому выражение для среднего нормального напряжения можно преобразовать к виду

$$\sigma_0 = (2\sigma_\rho + \sigma_z)/3 = \sigma_\rho (2 + \sigma_z / \sigma_\rho)/3. \quad (4.9)$$

Обозначим отношение  $\sigma_\rho / \sigma_z$  как  $\alpha$  - коэффициент бокового давления. Тогда

$$\sigma_0 = \sigma_\rho (2 + 1/\alpha) / 3 = \sigma_\rho (1 + 2\alpha) / (3\alpha).$$

Из второго уравнения системы (4.8) получим

$$3\sigma_0(\alpha - 1)/(1 + 2\alpha) = (2/3)\sigma_{s0}^2 (\partial/\partial\sigma_0). \quad (4.10)$$

Принимаем, что  $\varphi = \varphi(\sigma_0)$ , поскольку влияние среднего напряжения на величину коэффициента  $\varphi$  значительно больше, чем влияние плотности порошка. При этом допущении (4.10) преобразуется к виду

$$3\sigma_0(\alpha - 1)/(1 + 2\alpha) = 2\sigma_{s0}^2 \varphi \frac{\partial\varphi}{\partial\sigma_0} / 3. \quad (4.11)$$

Интегрируя (4.11) с учетом граничного условия: при  $\sigma_0 = 0$   $\varphi = \varphi_0$ , получаем

$$\varphi^2 = 9(9 - 1)\sigma_0^2 / [2(1 + 2\alpha)\sigma_{s0}^2] + \varphi_0^2. \quad (4.12)$$

С учетом (4.12) запишем (4.7) так:

$$3(\sigma_\rho - \sigma_z)^2 / [2(1 - \alpha)] + 3\tau_{pz}^2 = \sigma_i^2 = \sigma_s^2, \quad (4.13)$$

где  $\sigma_s$  - условное напряжение текучести заготовки.

Схема процесса формования в закрытой матрице приведена на рис. 34. Введены следующие обозначения относи-

тельных размеров:  $\rho = \bar{\rho} / \bar{R}$ ,  $z = \bar{z} / \bar{R}$ ,  $h = \bar{h} / \bar{R}$  ( $\bar{\rho}$ ,  $\bar{R}$ ,  $\bar{z}$ ,  $\bar{h}$  показаны на рис. 34).

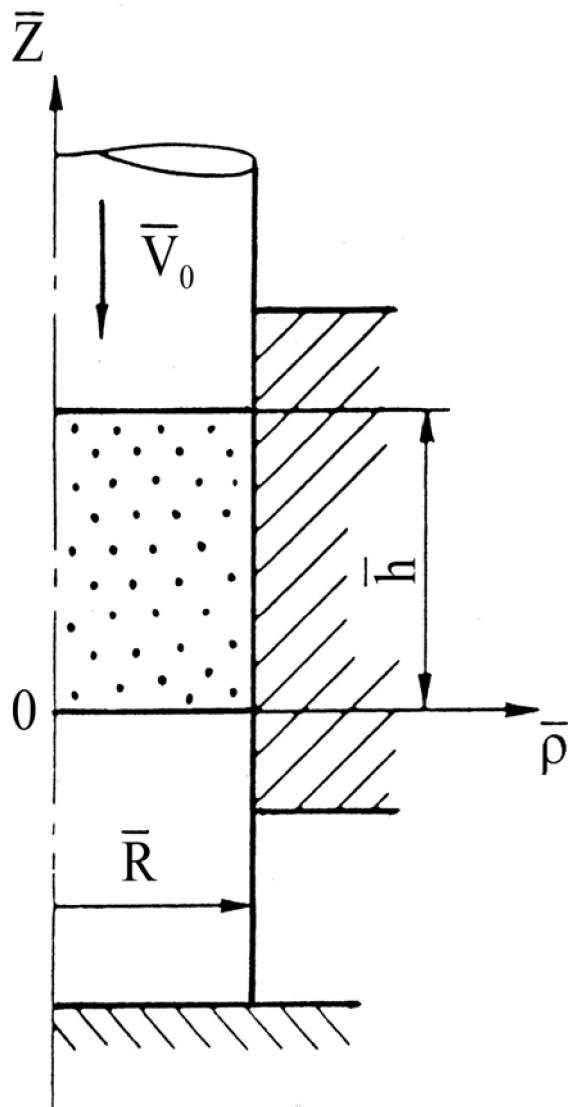


Рис. 34. Схема формирования порошковой заготовки в закрытой матрице

Уравнения равновесия имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial \rho} + \frac{\tau_{\rho z}}{\rho} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

Из условия пластичности (2.13), пренебрегая касательными напряжениями, получим

$$\partial\sigma_\rho / \partial z = \partial\sigma_z / \partial z. \quad (4.15)$$

В уравнениях равновесия принимаем, что  $\tau_{\rho z} = \varphi(z)f'(\rho)$ .

С учетом (4.15) получим

$$\left. \begin{aligned} \partial\sigma_\rho / \partial\rho &= -\varphi'(z)f(\rho), \\ \partial\sigma_\rho / \partial z &= -\varphi(z)[f'(\rho) + f(\rho)/\rho]. \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

После дифференцирования первого уравнения (4.16) по  $z$ , а второго по  $\rho$ , получим две равные между собой функции разных переменных, которые обозначим  $\beta$ :

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \varphi''(z)/(z), \\ \beta &= [f''(\rho) + f'(\rho)/\rho - f(\rho)/\rho^2] / f(\rho). \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

Решая первое уравнение системы (4.17), 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 (4.17) преобразуется к виду

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

Решение этого уравнения, согласно справочнику Э. Кам-  
ке,

$$f(\rho) = C_3 I_1(\sqrt{\beta}\rho) + C_4 K_1(\sqrt{\beta}\rho), \quad (4.18)$$

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  $(z)$  получим

$$\tau_{\rho z} = C_1 (e^{\sqrt{\beta}z} - e^{-\sqrt{\beta}z}) C_3 I_1(\sqrt{\beta}\rho), \quad (4.19)$$

где

$$I_1(\sqrt{\beta}\rho) = \sum_{k=0}^{\infty} (\sqrt{\beta}\rho/2)^{2k+1} / [(k+1)!k!].$$

Ограничиваясь двумя первыми членами ряда (4.19), имеем

$$\tau_{\rho z} = C_5 \sqrt{\beta} (e^{\sqrt{\beta}z} - e^{-\sqrt{\beta}z}) (\rho/2 + \beta\rho^3/16). \quad (4.20)$$

Принимаем, что контактные касательные напряжения по боковой поверхности распределяются пропорционально нор-

мальным напряжениям, т.е.  $\tau_{\rho z} = \mu \sigma_{\rho}$ . Подставляя (4.20) в (4.16) и интегрируя, получаем при  $z = h$

$$\sigma_{z|z=h} = -C_5 \beta (e^{\sqrt{\beta}h} + e^{-\sqrt{\beta}h}) (\rho^2 / 4 + \beta \rho^4 / 64) + C_6. \quad (4.21)$$

Аналогично при  $\rho = h$

$$\sigma_{\rho|\rho=h} = -C_5 \beta (e^{\sqrt{\beta}z} + e^{-\sqrt{\beta}z}) (1 + \beta / 4) + C_7. \quad (4.22)$$

Постоянные интегрирования найдем, используя условие пластичности (4.13) в виде:

$$\text{при } \rho = 0, \quad z = h, \quad \tau_{\rho z} = 0, \quad \sigma_z = -\sqrt{2/[3(1-\alpha)]} \sigma_s, \quad (4.23)$$

$$\text{при } \rho = 1, \quad z = 0, \quad \tau_{\rho z} = 0 \quad \sigma_{\rho} = -\sqrt{2\alpha^2/[3(1-\alpha)]} \sigma_s.$$

Подставим (4.23) в (4.21) и (4.22):

$$C_6 = -\sqrt{2/[3(1-\alpha)]} \sigma_s,$$

$$C_7 = -\sqrt{2\alpha^2/[3(1-\alpha)]} \sigma_{s0} + 2C_5(1 + \beta/4).$$

Определим  $\beta$  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  $\rho = 1$ ,  $z = h$ ,  
 $\tau_{\rho z} = \mu\sigma_{\rho}$

$$C_5 = 8\mu\sigma_{s0} \sqrt{2\alpha^2 / [3(1 - \alpha)]} / [\sqrt{\beta}(8 + \beta)sh(\sqrt{\beta}h) - 4\mu(4 + \beta)(ch\sqrt{\beta}h - 1)]. \quad (4.24)$$

После определения всех постоянных интегрирования из (4.21) выводим формулу для определения удельной силы формования

$$q = \left\{ \frac{\mu\alpha\beta(24 + \beta)ch(\sqrt{\beta}h)}{12[\sqrt{\beta}(8 + \beta)sh(\sqrt{\beta}h) - 4\mu(4 + \beta)(ch\sqrt{\beta}h - 1)]} + 1 \right\} \times \sqrt{2 / [3(1 - \alpha)]} \sigma_s. \quad (4.25)$$

На рис. 2.4 приведены зависимости, полученные в соответствии с описанной выше методикой. Величину коэффициента бокового давления  $\alpha$  можно определить экспериментально, например, используя штамп со встроенными точеч-

ными месдозами. В данном исследовании нами использовались величины  $\alpha$ , полученные И.Д. Радомысельским.

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. 35, можно аппроксимировать формулой:

$$\sigma_s = a\gamma^b,$$

где  $\sigma_s$  измеряется в МПа,

$\gamma$  – средняя плотность заготовки, в кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициенты имеют значения:

для ПЖВ2.160.28  $a = 70,7 \cdot 10^{-12}$ ;  $b = 3,34$ ;

для ПЖВ4.160.28  $a = 102,8 \cdot 10^{-12}$ ,  $b = 3,36$ .

Таким образом, предлагаемая методика позволяет определить условное напряжение текучести с учетом реальных свойств пористого материала.

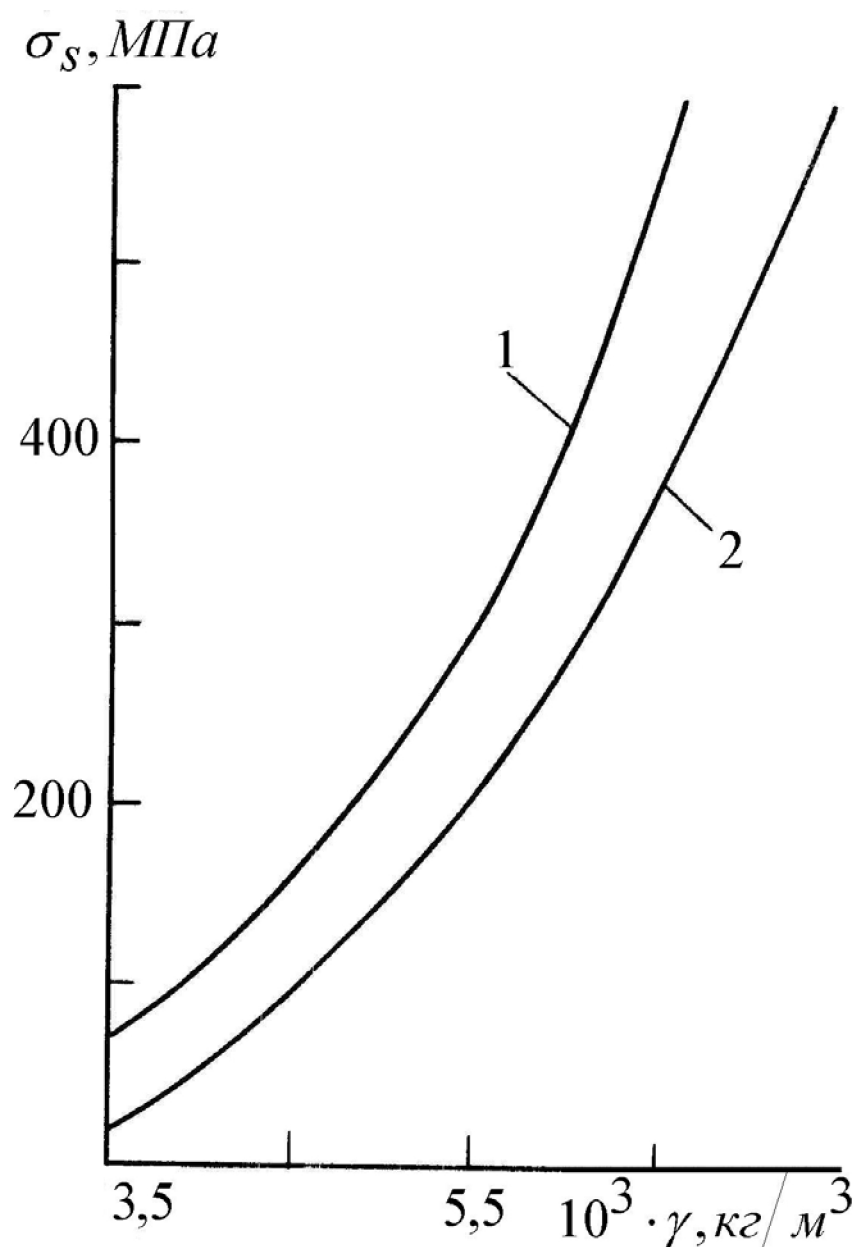


Рис. 35. Зависимости условного напряжения текучести от плотности заготовки: 1 – порошок ПЖВ4.160.28; 2 – порошок ПЖВ2.160.28

### 4.3. Оценка гидростатического давления по размеру

Для упрощения теоретического анализа реальный дискретный материал заменяют идеализированной моделью – системой частиц правильной геометрической формы. При

этом выделяют так называемый представительный объем пористого материала. Ранее были получены модели представительного объема в виде различных геометрических форм.

Недостатком указанных моделей является их излишняя абстрактность и невозможность связать изменение представительного объема с реальными порами, имеющими место между частицами в заготовке. Пористость отдельных областей изделия может быть определена путем замера пор на фотографиях шлифов сечений, выполненных с большим увеличением с помощью микроскопа. При наличии зависимости, связывающей пористость с величиной гидростатического давления, последнее может быть оценено по размеру поры [6].

Принята модель пористого тела в виде плотноупакованных шаров одинакового диаметра, рис. 36.

Коэффициент компактности такой упаковки, как известно из литературы по кристаллическому строению тел, равен 0,7405. Остальное пространство приходится на поры между шарами. Имеют место два типа пор. Поры 1 – тетраэдрические, в них можно вписать сферу радиусом  $0,22 R$ , где  $R$  – радиус шаров. Поры 2 – октаэдрические, в них можно вписать сферу радиусом  $0,41 R$ .

Для определения объема, приходящегося на поры каждого из двух типов, по размерам сфер, которые могут быть вписаны в поры, определены размеры пирамиды и куба, показанных на схематичном изображении соответственно тетраэдрической и октаэдрической пор на рис. 36.

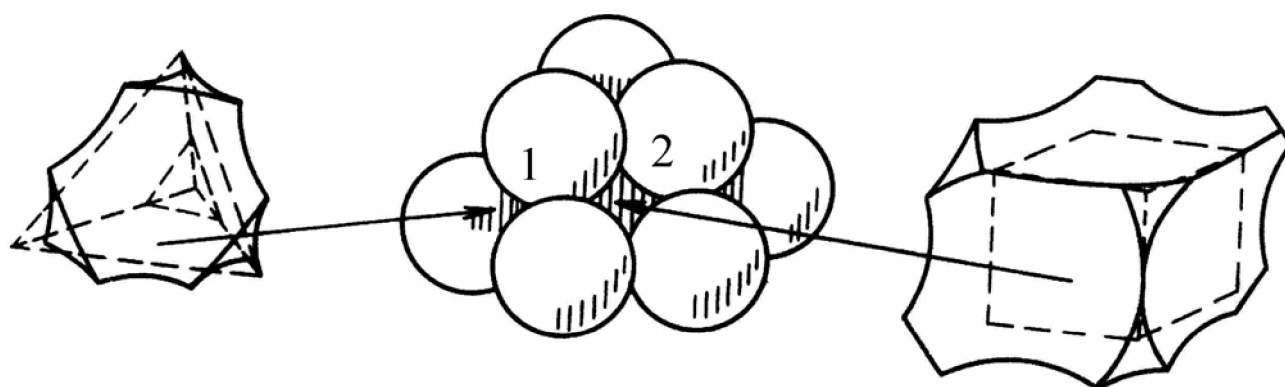


Рис. 36. Модель пористого тела в виде плотноупакованных шаров одинакового диаметра: 1 – тетраэдрическая пора;  
2 – октаэдрическая пора

Из тригонометрического анализа установлено, что ребро четырехугольной пирамиды, описанной вокруг сферы радиуса  $0,22R$ , равно  $1,08 R$ . Ребро куба, описанного вокруг сферы радиуса  $0,41 R$ , равно  $0,82 R$ . Объемы пирамиды и куба равны соответственно  $0,297 R^3$  и  $0,551 R^3$ . Вершины пирамиды выходят за пределы тетраэдрической поры. Они при определении объема поры должны быть исключены. Основания отсекаемых вершин пирамиды расположены в плоскостях,

производящих диаметрально сечения трех соприкасающихся шаров. Радиус окружности, которую можно вписать в зазор между тремя соприкасающимися кругами радиуса  $R$ , равен  $0,155 R$ . Сторона треугольника, описанного вокруг этой окружности и являющегося основанием отсекаемой вершины, равна  $0,537 R$ , откуда объем каждой из отсекаемых вершин пирамиды  $0,018 R^3$  и объем пирамиды без четырех вершин равен  $0,225 R^3$ .

Объем шара с радиусом  $R$  равен  $4,187 R^3$ . Поскольку коэффициент компактности упаковки  $0,7405$ , то приходящийся на один шар объем упаковки равен  $5,654 R^3$ , откуда суммарный объем приходящийся на один шар пор равен  $1,467 R^3$ ,

$$V_{\Sigma} = 2V_T + V_0,$$

где  $V_T, V_0$  – объем тетраэдрической и октаэдрической пор.

В это равенство входят определенные выше объемы двух пирамид с отсеченными вершинами и объем куба, а также являющиеся единственными неизвестными в равенстве объемы прилегающих к вершинам пор участков (рис. 36), имеющих место из-за кривизны ребер. Поскольку в суммарный объем входит 16 таких привершиненных участков, объем каждого из них равен  $0,029 R^3$ . В результате

$$V_T = 0,342 R^3, V_0 = 0,783 R^3.$$

При пластическом деформировании шаров каждая тетраэдрическая пора заполняется с четырех сторон, причем с каждой стороны металл течет в сужающуюся полость. Октаэдрическая пора заполняется с шести сторон. Часть объема тетраэдрической поры, заполняемая одним деформируемым шаром, равна  $0,13 R^3$ . Расстояние, которое проходит металл с каждой стороны при заполнении тетраэдрической поры, равно радиусу сферы, которая может быть вписана в эту пору, и составляет  $0,22R$ . Расстояние, которое проходит металл с каждой стороны при заполнении октаэдрической поры, равно  $0,41 R$ . Хотя форма полости, заполняемой со стороны каждого шара, близка к пирамидальной, трение имеет место не по всей поверхности граней: оно отсутствует вблизи ребер пирамиды. Поэтому допущение, что со стороны каждого шара заполняется коническая полость, имеющая меньшую по сравнению с пирамидальной боковую поверхность, представляется правомерным. По известным объему и высоте определены площади и радиусы оснований таких условных конусов.

Для тетраэдрической поры:  $F_T = 1,2 R^2$ ;  $r_T = 0,618 R$ ,

для октаэдрической поры:  $F_0 = 0,95 R^2$ ;  $r_0 = 0,55 R$ .

Углы при вершинах конусов:  $2\gamma_T = 140^\circ$ ;  $2\gamma_0 = 106^\circ$ .

В литературе содержится строгое решение дифференциальных уравнений равновесия и уравнения, определяющего условие пластичности металла, при рассмотрении равновесия пластической массы, заполняющей форму конуса.

Подставляя в выражение для силы в зависимости от размеров полости определенные выше размеры конусов, которыми схематизировано заполнение поры, получим при  $\mu = 0,5$  соответственно для тетраэдрической и октаэдрической пор:

$$\sigma = 2\sigma_s \ln\left(1,2 \frac{R^2}{f}\right)$$

$$\text{и } \sigma = 1,87\sigma_s \ln\left(0,95 \frac{R^2}{f}\right),$$

где  $f$  – площадь меньшего основания конуса.

По этим формулам рассчитаны давления выдавливания в поры частиц железного порошка при различных значениях  $f$ .

В расчете напряжение текучести определялось по диаграмме истинных напряжений для стали 10. Степени деформации были рассчитаны как средние по высоте конуса по формуле

$$e = \ln[1 + (F - f/2)/F].$$

По результатам расчета построены представленные на рис. 37 графики зависимости объема пор от величины давления всестороннего равномерного сжатия порошкового материала.

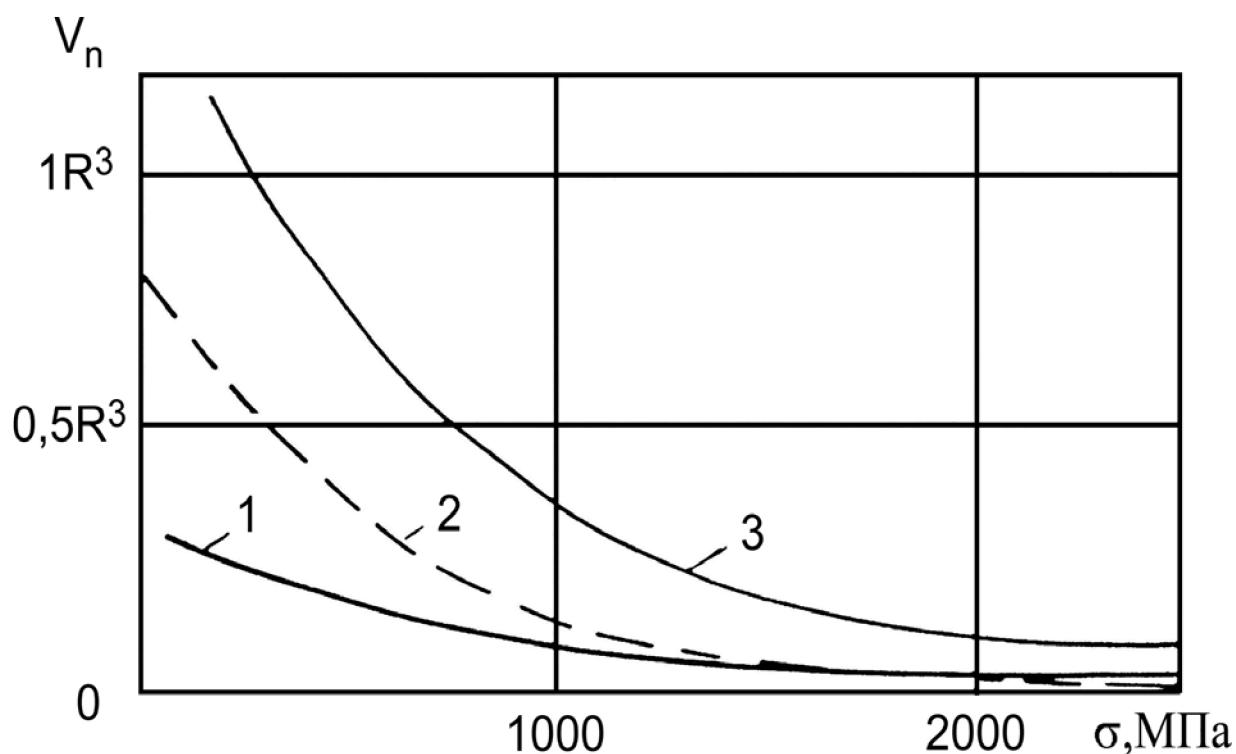


Рис. 37. Зависимость объемов пор, приходящихся на одну шаровую частицу радиуса  $R$ , от величины гидростатического давления: 1 – объем тетраэдрических пор; 2 – объем октаэдрических пор; 3 – суммарный объем пор. Коэффициент контактного трения

$$\mu = 0,5$$

Из графиков видно, что тетраэдрические поры являются более «жесткими» по сравнению с октаэдрическими, и изме-

нение пористости порошкового материала происходит в большей степени за счет изменения объема октаэдрических пор.

На рис. 38 (кривая 1) представлена полученная в результате приведенного анализа зависимость пористости изделия от величины гидростатического давления. На этом же рисунке приведена перестроенная в координаты  $\delta = f(\sigma)$  зависимость (кривая 2), заимствованная из работы Н.Ф. Кунина и Б.Д. Юрченко, полученная в результате эксперимента по уплотнению железного порошка и пересчета результатов для исключения трения на контакте с инструментом. В области напряжений до 200 МПа расхождение между кривыми значительное, поскольку выше рассмотрено уплотнение плотноупакованных шаров, в то время как кривая 2 – уплотнение насыпанного в матрицу порошка.

Расхождение между кривыми – это давление, необходимое, чтобы привести частицы в состояние, близкое к плотной упаковке. При напряжениях выше 300 МПа кривые практически сливаются между собой.

Полученная зависимость между плотностью и средним главным напряжением аппроксимирована формулой

$$\sigma_0 = 0,1 \exp \left[ 10,47 - 1,52 \ln \left( 30,5 - 3,9 \cdot 10^{-3} \gamma \right) \right], \text{ МПа.}$$

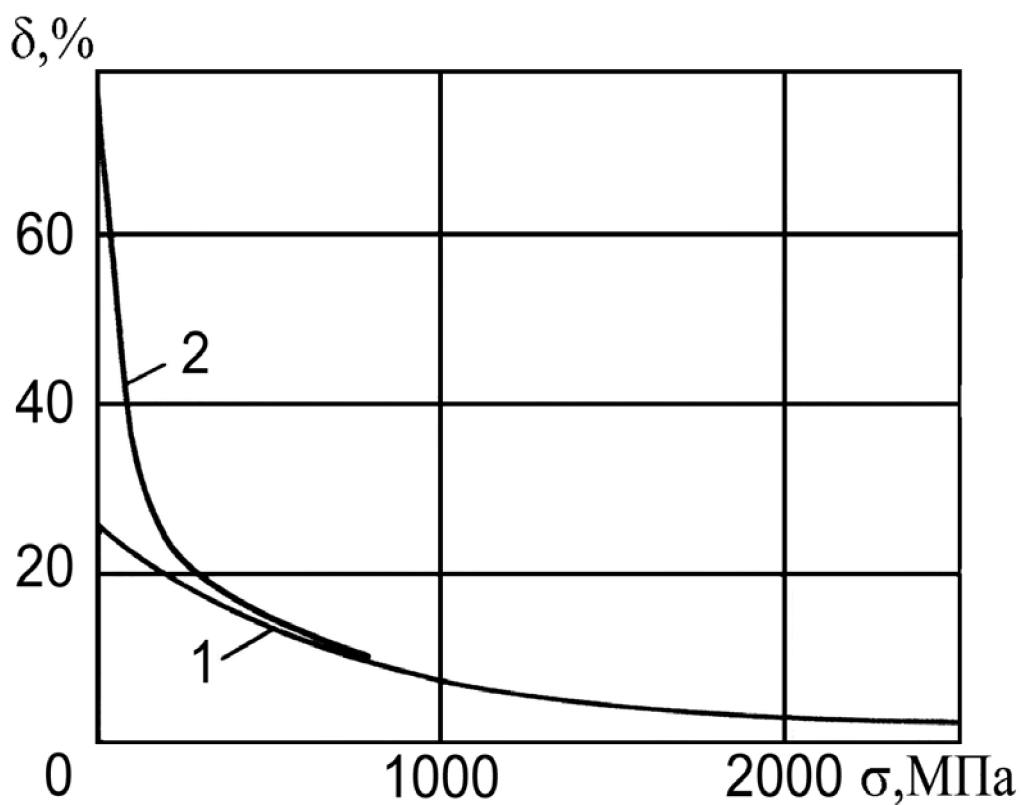


Рис. 38. Зависимость остаточной пористости образца от величины гидростатического давления: 1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальная кривая

Предложенный метод применен авторами при решении ряда практических задач.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – 6-е изд. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.

2. Машиностроение. Энциклопедия / ред. совет: К.В. Фролов (пред.) [и др.]. Машины и оборудование кузнечно-штамповочного и литейного производства. Т. 4 / Ю.А. Бочаров, И.В. Матвеев [и др.]; под общ. ред. Ю.А. Бочарова, И.В. Матвеева. – М.: Машиностроение, 2005. – 926 с. Пункт 2.10.2. Специализированные прессы. – С. 175-180.

3. Клячко, Л.И. Оборудование и оснастка для формования порошковых материалов / Л.И. Клячко, А.М. Уманский, В.Н. Бобров. – М.: Металлургия, 1986. – 336 с.

4. 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.

5. Лякишев, Н.П.. Наноматериалы конструкционного назначения / Н.П. Лякишев, М.И. Алымов, С.В. Добаткин // Конверсии в машиностроении. – 2002. – № 6. – С. 125-129.

6. Гуляев, Ю.В. Углеродные нанотрубные структуры - новый материал для эмиссионной электроники / Ю.В. Гуляев // Вестн. Российской академии наук. Т. 73. – № 5. – 2003. – С. 389-391.

7. Валиев, Р.З. Развитие РКУ прессования для получения ультрамелкодисперсных металлов и сплавов / Р.З. Валиев // Матер. конф. V Междунар. форума "Высокие технологии XXI века". – М., 2004. – С. 382-387.

8. 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.

9. Пластическая обработка металлов простым сдвигом / В.М. Сегал, В.И. Резников, А.Е. Дробышевский [и др.] // Металлы. – 1981. – № 1. – С. 99-105.

10. Церна, И.А. Анализ механического устройства разгрузки винтового пресса для штамповки с кручением / И.А. Церна, А.В. Сафонов // Известия вузов. – М.: Машиностроение. – 1985. – № 11. – С. 95-99.

11. Нанотехнологии в ближайшем десятилетии. Прогноз направлений исследований / под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса, П. Аливисатоса; пер. с англ. – М.: Мир, 2002. – 292 с.

Учебное издание

*Дмитриев Александр Михайлович*  
*Гречников Федор Васильевич*  
*Коробова Наталья Васильевна*

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ПРЕССЫ  
ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ  
И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

*Учебное пособие*

Технический редактор В. Р. К а р г и н  
Редакторская обработка Ю. Н. Л и т в и н о в а  
Корректорская обработка А. В. Я р о с л а в ц е в а  
Доверстка Н. А. Б е р е з и н а

Подписано в печать 13.12.07. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 7,0

Тираж 120 экз. Заказ . ИП-ж134/2007

Самарский государственный  
аэрокосмический университет.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.