

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

На правах рукописи

Савонькин Михаил Борисович

Исследование течения металла при осадке цилиндрических заготовок бойками с осевым отверстием и разработка промышленного применения полученных результатов

05.16.05 – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук,  
профессор В.А. Тюрин

Москва – 2018

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Аналитический обзор литературы.....	8
1.1 Характеристика дисков и колес – изделий ответственного назначения...	8
1.1.1 Геометрические формы.....	8
1.1.2 Область применения.....	10
1.1.3 Размеры и масса.....	10
1.1.4. Структура металла.....	11
1.1.5 Характеристика силовых условий работы дисков.....	12
1.2 Технологические процессы получения дисков.....	24
1.2.1 Операции кузнечных технологий при изготовлении дисков.....	26
1.3 Течение металла при осадке бойками с осевым отверстием.....	32
1.4 Анализ полноты исследования механико-кинематических условий осадки бойками с осевым отверстием.....	39
Выводы по аналитическому обзору литературы.....	41
1.5 Задачи исследования.....	42
Глава 2 Методики исследования течения металла при ОМД.....	43
2.1 Знаки, фиксирующие местные деформации в заготовках.....	43
2.2 Выбор методов решения задач, поставленных в работе.....	46
2.2.1 Количественные методы.....	46
2.2.2 Качественные методы исследования.....	49
2.2.3 Характеристика выбранных методов исследования.....	52
2.2.4 Применение метода слоистых заготовок.....	52
2.2.5 Применение метода координатных сеток.....	66
Глава 3 Исследование зон деформации и затекания заготовки в отверстия бойков.....	81
3.1 Зоны деформации.....	81
3.2 Затекание заготовки в отверстия бойков.....	84
3.2.1 Графические зависимости на плоскости.....	85

3.2.2 Трехмерные изображения.....	94
3.2.3 Потокораспределение в заготовке.....	101
Глава 4 Исследование конфигурация очага деформации при обжатии бойками с осевым отверстием.....	105
4.1 Графоаналитические и расчетные построения.....	105
4.2 Изображения очага деформаций.....	114
Глава 5 Практическое применение результатов исследований.....	117
5.1 Результаты исследования, имеющие признак практической применимости.....	117
5.1.1 Возможность уменьшения потерь металла при механической обработке поковок.....	117
5.1.2 Возможность повышения уровня механических свойств металла поковок.....	117
5.1.3 Организация встречных потоков металла в направлении «к оси» заготовки.....	118
5.2 Осевая усадочная полость (ОУП).....	119
5.2.1 Зарубежные данные теоретических исследований.....	119
5.2.2 Опыт отечественных исследований.....	120
5.3 Разработка и изготовление бойков для проработки литой структуры.....	122
5.4 Патентная защита технических решений.....	124
5.5 Использование результатов диссертационного исследования в лабораторном практикуме ОМД.....	124
Заключение.....	125
Список литературы.....	128
Приложение А Заключение о промышленной применимости результатов диссертационной работы.....	135
Приложение Б Патент на изобретение №2412018.....	136
Приложение В Акт о внедрении результатов исследования в учебный процесс.....	137

## Введение

В связи с продолжающимся процессом развития отечественной промышленности, выпускающей изделия ответственного назначения, в частности, типа дисков, возникла настоятельная необходимость оказать научную и техническую поддержку этому процессу. Особое внимание приобретает разработка ресурсосберегающих технологий, позволяющих уменьшить энергозатраты, сэкономить дорогостоящие специальные стали и сплавы и уменьшить трудозатраты на выпуск изделий.

Весьма важным фактором для современных условий прогресса отечественной промышленности является восполнение утраченных ранее научного потенциала и теоретических обоснований в производстве уникальных изделий, в частности, кованных и штампованных крупногабаритных изделий типа дисков с одной или двумя ступицами. Ввиду этого имело смысл провести непосредственное экспериментальное исследование, посвященное изучению течения металла при осадке заготовок бойками с осевым отверстием и разработке на основании результатов исследования, ресурсосберегающей технологии получения изделий ответственного назначения типа дисков с цапфами.

В качестве объекта исследования диссертантом выбран процесс осадки цилиндрических заготовок бойками с осевым отверстием для получения поковок типа дисков. Процесс относится к ресурсосберегающим и высокоэффективным по деформационному воздействию на структуру металла.

Однако, несмотря на многолетнюю историю, как минимум с 1936 года, его нельзя отнести к окончательно исследованным. В частности, нет сведений о конфигурации и границах очага деформации, распределении местных деформаций и кинематических параметрах течения металла и формообразовании поковки.

Цель и задачи работы.

Целью диссертационной работы является исследование течения металла и механико-кинематических параметров процесса осадки цилиндрических заготовок бойками с осевым отверстием для промышленного применения.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать течение материалов – пластические потоки, положение нейтральных поверхностей и границ раздела потоков при осадке бойками с осевым отверстием.

2. Разработать конструкцию заготовок, оснастки и методику эксперимента для исследования процесса осадки бойками с осевым отверстием.

3. Изучить механико-кинематические параметры процесса затекания материала в осевое отверстие бойков при осадке.

4. Установить режимы формообразования боковой поверхности поковки – выпуклой, вогнутой, комбинированной при осадке бойками с осевым отверстием.

5. Получить количественные данные о распределении местных деформаций в объеме заготовки при осадке бойками с осевым отверстием.

6. Установить конфигурацию и границы зон и очага деформации в заготовке при осадке бойками с осевым отверстием.

7. Определить режимы деформирования заготовки и установить количественные соотношения геометрических параметров системы «инструмент-заготовка» для заданного регулирования течения материала в составные элементы диска при осадке бойками с осевым отверстием.

8. Оценить адекватность моделирования процесса течения заготовок из пластилина.

9. Разработать процесс осадки заготовок для промышленного применения.

Научная новизна работы.

1. В процессе осадки в заготовке существует поверхность раздела пластических потоков – нейтральная, которая перемещается в направлении к свободной поверхности для соотношения  $D_{отв}/D_0 = 0,55$  и в направлении к оси для  $D_{отв}/D_0 = 0,72$ .

2. Изменение суммарной высоты заготовки при осадке может быть как положительным, так и отрицательным. Граница этого явления – отсутствие изменения высоты заготовки зависит от геометрических параметров в системе «инструмент-заготовка» и соответствует  $D_0/H_0 = 0,8$  при всех исследованных значениях  $D_{отв}/D_0$  и  $\varepsilon_{0H}$ .

3. Зоны наибольших местных деформации в заготовке могут распределяться как в полотно диска, так и по середине высоты заготовки. Зоны минимальных деформаций, как правило, примыкают к цапфам диска.

4. Конфигурация очага деформации определяется деформационными перемещениями, происходящими как к свободной боковой поверхности, так и к оси, что соответствуют распределению макропотоков материала в заготовке.

5. Форма боковой поверхности при осадке может быть вогнутой не только для высоких заготовок, но и для средних и низких и зависит от соотношения диаметра отверстия в бойке к диаметру заготовки ( $D_{отв}/D_0$ ).

Практическая значимость работы.

Установлены соотношения геометрических и деформационных параметров в системе «инструмент-заготовка», позволяющие получить заданное распределение местных деформаций. Установлена возможность деформационного воздействия на осевую усадочную полость, появляющуюся в удлиненных слитках, в частности ее закрытия.

Результаты диссертационной работы применяют в лаборатории кафедры «Обработки металлов давлением» НИТУ «МИСиС» с 2006 года в трех студенческих группах, как для дневного, так и вечернего обучения.

Вся оснастка была разработана, спроектирована и изготовлена лично диссертантом.

Таким образом, результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс в течение многих лет и в достаточно большом объеме.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных задач в работе применены 5 методов: 3 физических (слоистых заготовок, координатных сеток, макрозерен) и 2 графоаналитических (полей линий скольжения и конечных элементов). Методология заключается в решении конкретной задачи с помощью одного или двух методов, взаимодополняющих друг друга.

Положения, выносимые на защиту.

1. Перемещение нейтральной поверхности в различных направлениях: к свободной поверхности для соотношения  $D_{отв}/D_0 = 0,55$  и в направлении оси для  $D_{отв}/D_0 = 0,72$ .

2. Границы явления как положительного, так и отрицательного изменения суммарной высоты заготовки.

3. Распределение зон наибольших местных деформаций как в полотно диска, так и по середине высоты заготовки.

4. Конфигурация очага деформации определяется деформационными перемещениями, происходящими как к свободной боковой поверхности, так и к оси, что соответствует распределению макропотоков материала в заготовке.

5. Форма боковой поверхности при осадке может быть вогнутой не только для высоких заготовок, но и для средних и низких и зависит от соотношения диаметра отверстия в бойке к диаметру заготовки ( $D_{отв}/D_0$ ).

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов обеспечена применением общепринятых при исследовании процессов обработки металлов давлением методов, согласованностью результатов, полученных различными методами.

Основные результаты работы были представлены и обсуждены на следующих конференциях: Международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции 62, 63, 64, 65-е Дни науки студентов МИСиС (Москва, 2007-2010); Прогрессивные технологии пластической деформации (Москва, 2009); IV Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии обработки металлов давлением» (Москва, 2011); Международном научно-техническом конгрессе «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии» (Москва, 2014).

### 1.1 Характеристика дисков и колес – изделий ответственного назначения

В современном машиностроении изделиями ответственного назначения принято считать такие, от работоспособности (отказов в работе) которых зависят человеческие жизни и сохранность материальных ценностей и технических устройств. Из многочисленных объектов такого назначения в диссертационной работе выбраны изделия, получаемые по кузнечным технологиям, в которых основной операцией является осадка, а исходной заготовкой – слиток.

Конкретные выбранные изделия – диски (в том числе газовых турбин), железнодорожные колеса и бандажи, а также тяжело нагруженные шестерни (рисунок 1.1).

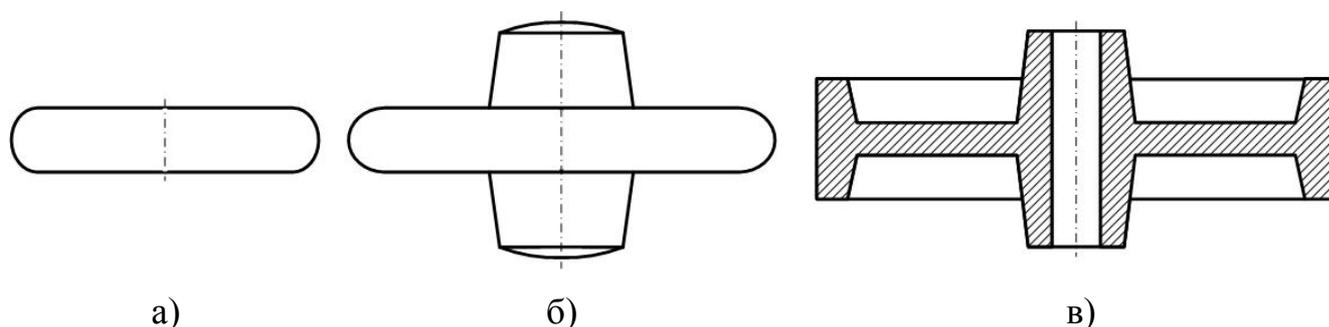


Рисунок 1.1 – Эскизы поковок «гладкого» диска (а), диска с цапфами (б), шестерни и железнодорожного колеса (в)

#### 1.1.1 Геометрические формы

Геометрические формы дисков и колес как объектов исследования представляют интерес с точки зрения построения схем пластического течения при осадке слитков, преобразования и возможности управления макростроением изделия.

Анализ семидесяти одного литературного источника позволил выделить наиболее характерные формы исследуемых изделий, а также поковок для их изготовления, и объединить их в 4 группы (рисунок 1.2).

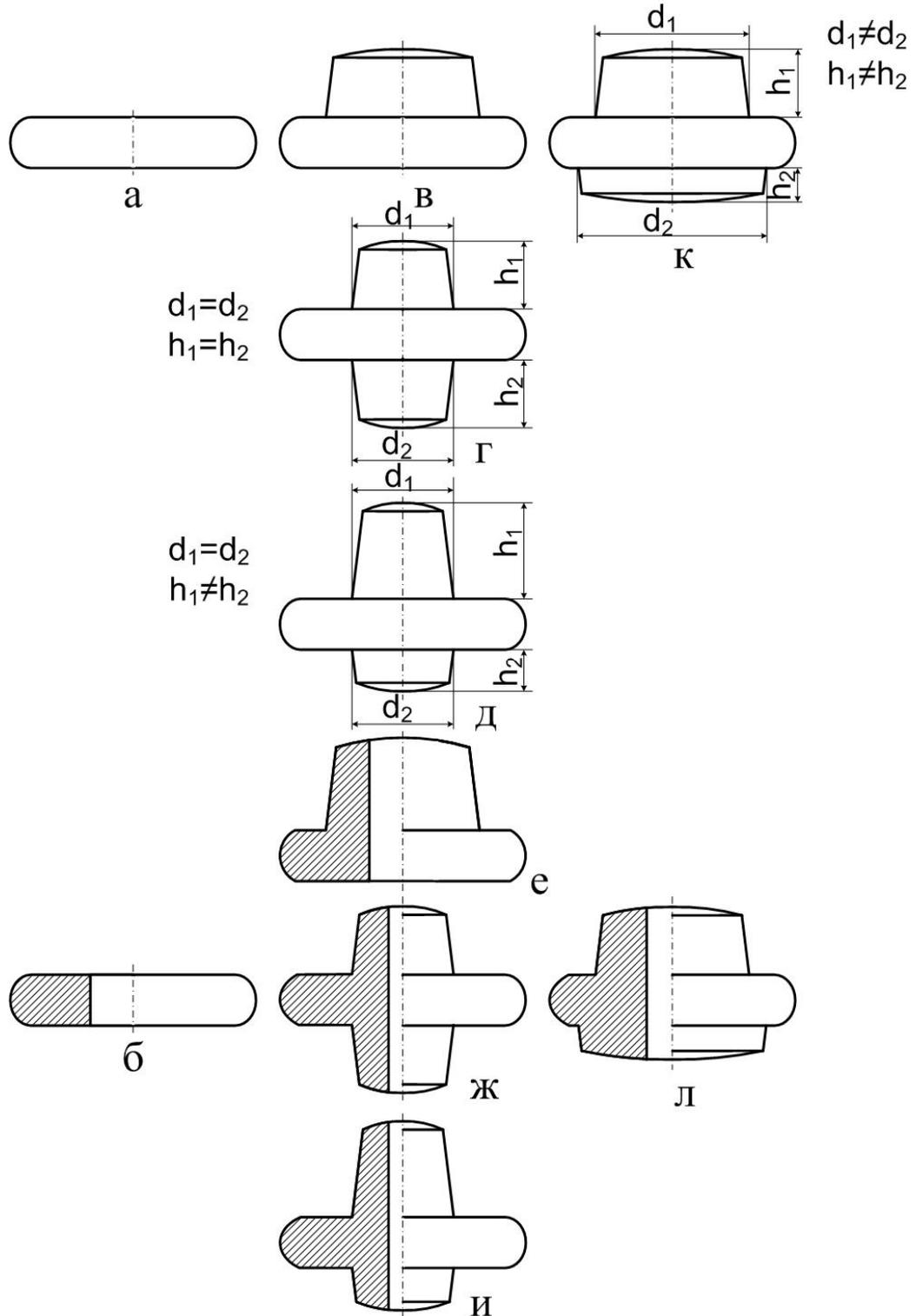


Рисунок 1.2 – Разновидности формы поковок типа дисков

В первую группу включили гладкие диски сплошные (рисунок 1.2, а) и диски с осевым отверстием (рисунок Рис 1.2, б). Во вторую группу включены сплошные диски с одной цапфой (рисунок 1.2, в), диски с цапфами одинаковой высоты и одного диаметра (рисунок 1.2, г), диски с цапфами одинакового диаметра, но разной высоты (рисунок 1.2, д), а также диски с осевым отверстием (рисунок 1.2, е, ж, и). В третью группу вошли сплошные диски с цапфами разного диаметра и разной высоты (рисунок 1.2, к) и диски с осевым отверстием (рисунок 1.2, л). Изделия с цапфами, имеющие осевое отверстие и спрофилированный обод (рисунок 1.1, в) представляют собой группу железнодорожных колес, бандажей и шестерен.

### 1.1.2 Область применения

Детали типа дисков предназначены для передачи крутящего момента от валов турбин, действующего в тангенциальном направлении, а типа колес – для передачи радиальных нагрузок.

В соответствии с такими особенностями условий эксплуатации, течение металла при изготовлении дисков будет радиальным, а при изготовлении колес – тангенциальным.

### 1.1.3 Размеры и масса

Размеры изделий в форме дисков и поковки для их изготовления, получаемые ковкой из слитков, могут достигать 3000-5500 мм при толщине диска до 800 мм. Для изготовления таких дисков поковки получают из слитков массой до 145 т [1], [2].

Диски с осевым отверстием без цапф изготавливают диаметром, не превышающим 500 мм [3].

Диаметр зубчатых колес может достигать 6000 мм [3].

Железнодорожные колеса в настоящее время производят диаметром от 700 до 1256 мм с высотой (длиной) ступицы от 90 до 300 мм, массой от 165 до 1050 кг [4], [5].

#### 1.1.4. Структура металла

Структура металла дисков и колес является ключевым параметром, определяющим их эксплуатационные и технологические свойства.

Механические свойства стали зависят от величины зерна: с увеличением зерна – снижаются.

На качество изделия оказывают влияние как наличие неметаллических включений, так и их тип и характер распределения по объему.

Качество изделий и поковок зависит от качества исходной заготовки – слитка с неоднородным кристаллическим строением, химическим составом, плотностью и распределением неметаллических включений [6], [7], [8], [9].

В слитке различают следующие зоны макростроения (рисунок 1.3) [10].

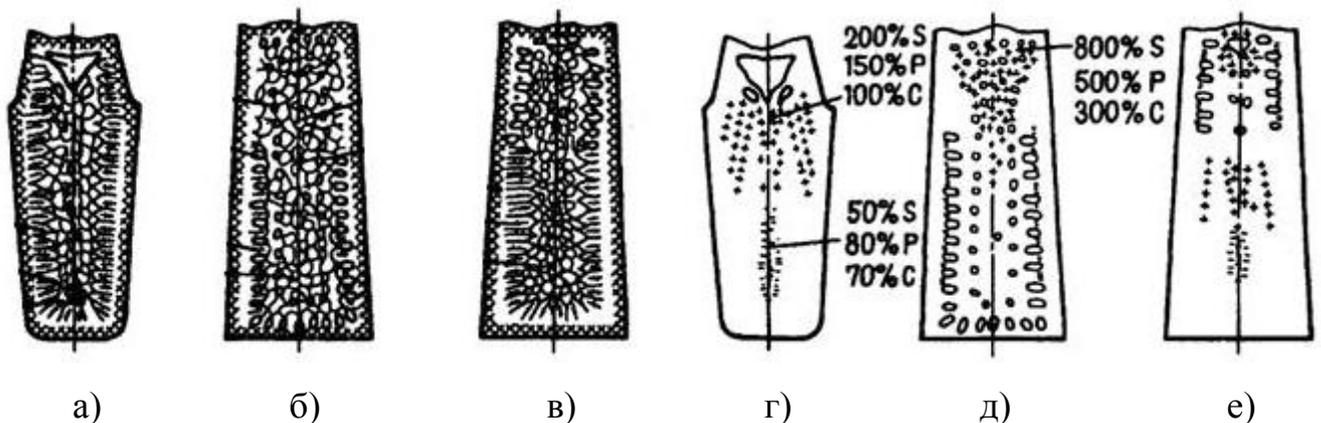


Рисунок 1.3 – Схема строения слитков спокойной (а, г), кипящей (б, д) и полуспокойной (в, е) стали

На поверхности слитка образуется зона мелких равноосных разориентированных кристаллов. Так образуется внешний слой слитка, называемый корковой зоной. За ней располагается зона, состоящая из столбчатых

кристаллов – дендритов, ориентированных перпендикулярно стенкам изложницы. Следующая часть слитка представляет собой зону крупных произвольно ориентированных кристаллов-дендритов. По высоте слиток состоит из прибыльной части, в которой находится усадочная раковина, корпуса слитка, который идет на изготовление поковки и донной части.

### 1.1.5 Характеристика силовых условий работы дисков

На материальные элементы вращающегося диска могут действовать силы в радиальном  $F_r$ , тангенциальном  $F_\theta$  и осевом  $F_o$  направлениях.

Для определения напряжений от центробежных сил рассматривают условие равновесия бесконечно малого элемента диска [11], [12], выделенного двумя цилиндрическими поверхностями с радиусами  $r + \frac{dr}{2}$  и  $r - \frac{dr}{2}$ , двумя радиальными плоскостями, проходящими через ось вращения под углом  $d_\theta$  (рисунок 1.4). Толщина элемента равна толщине диска.

Во вращающемся диске от действия центробежных сил на гранях рассматриваемого малого элемента возникнут напряжения: на цилиндрических поверхностях – радиальные напряжения  $\sigma_r$ , а на радиальных плоскостях – тангенциальные напряжения  $\sigma_\theta$ .

Связь между относительными удлинениями и напряжениями выражается законом Гука:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_\theta); \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \mu\sigma_r),$$

где  $\varepsilon_r$  и  $\varepsilon_\theta$  – относительные радиальные и тангенциальные удлинения;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$E$  – модуль упругости.

Решая эти уравнения относительно  $\varepsilon_r$  и  $\varepsilon_\theta$ , определяют:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_r + \mu\varepsilon_\theta); \quad \sigma_\theta = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_\theta + \mu\varepsilon_r).$$

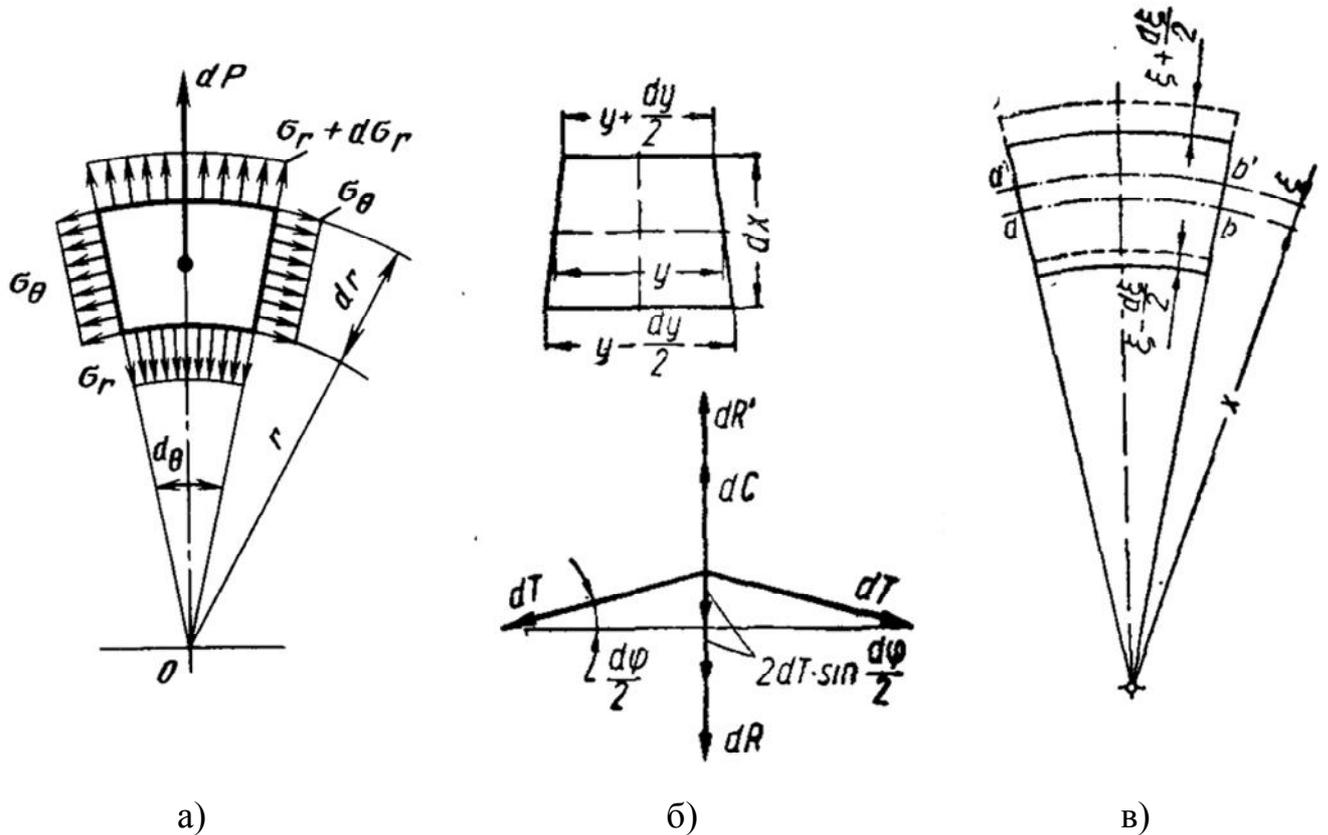


Рисунок 1.4 – Элемент вращающегося диска: а) – к условию равновесия элемента диска, б) – диаграмма сил, в) – деформация элемента диска

Центробежная сила собственной массы элемента диска будет составлять:

$$dF_r = r \cdot \omega^2 \cdot dm,$$

где  $dm$  – масса элемента.

$$dm = \rho \cdot b \cdot r \cdot d\theta \cdot dr,$$

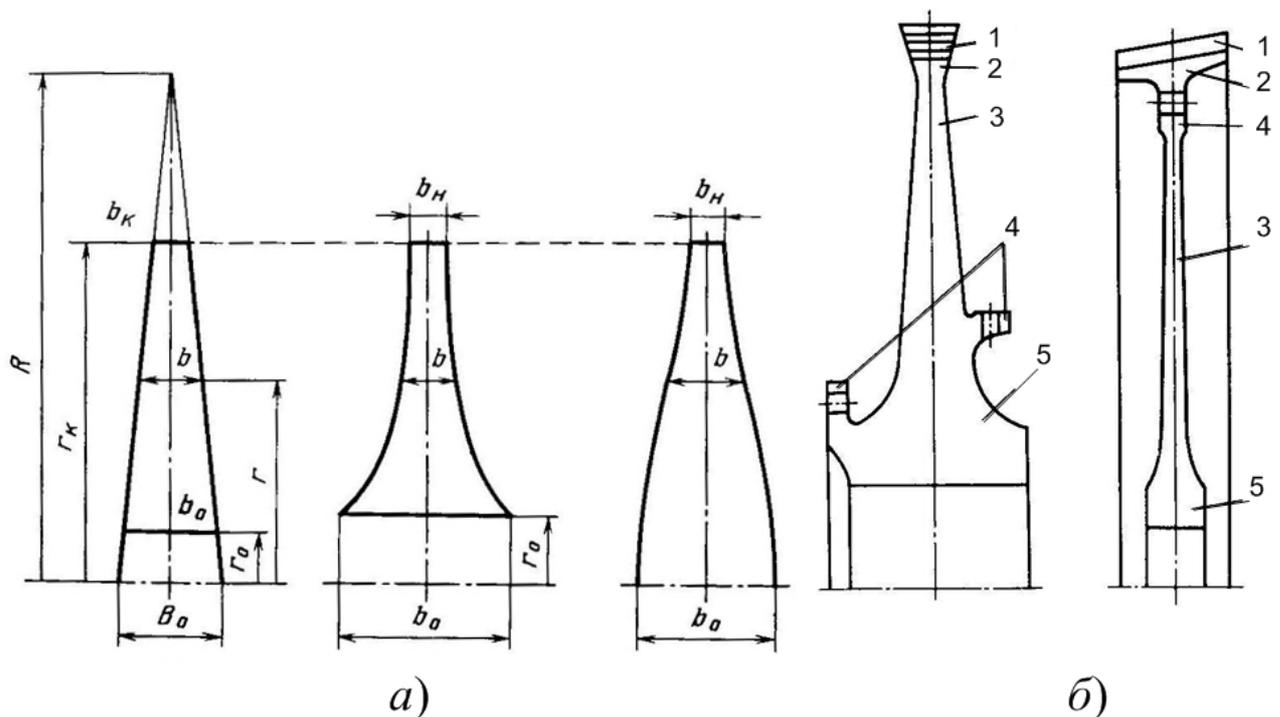
где  $\rho$  – плотность материала диска.

Из условия совместности тангенциальных и радиальных деформаций, учитывая связь между собой  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$ , получают закон изменения тангенциальных и радиальных напряжений в диске в зависимости от угловой скорости и его формы:

$$\frac{d\sigma_\theta}{dr} + \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} + \mu \cdot \sigma_r \cdot \frac{1}{b} \cdot \frac{db}{dr} = -\mu \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r.$$

На величину напряжений в диске и закон их распределения вдоль радиуса диска влияют форма полотна диска, наличие осевого отверстия и цапф, наличие и размеры обода, величина центробежных сил, угловая скорость.

Различные конструктивные требования и эксплуатационные условия работы дисков обуславливают разнообразие их форм и размеров. Однако, можно выделить несколько типов дисков, а также их составных элементов, присущих почти всем дискам (рисунок 1.5).



1 – замковая часть, 2 – обод, 3 – полотно диска, 4 – элементы крепления, 5 – ступица

Рисунок 1.5 – Геометрические формы полотна диска (а) и конструкции дисков газотурбинных двигателей (б)

Диском равного сопротивления является диск сплошного сечения без осевого отверстия, в котором радиальные и тангенциальные напряжения равны друг другу и одинаковы во всех точках его сечения (рисунок 1.6, а). При увеличении окружной скорости на периферии диска, его толщина на оси вращения должна возрастать. Так при окружной скорости 100 м/с толщина диска на оси вращения будет превышать толщину на периферии в 1,23 раза, а при

скорости 500 м/с уже в 184 раза [11]. Применение дисков равного сопротивления ограничено еще и тем, что они должны выполняться без осевого отверстия, что не позволяет их применять в конструкциях, в которых диски посажены на оси. Диски равного сопротивления применяются в конструкциях с консольным расположением диска, а также в сварных конструкциях.

Диски постоянной толщины ввиду простоты конструкции и их обработки находят широкое распространение. Тангенциальные и радиальные напряжения на оси вращения диска постоянной толщины сплошного сечения без осевого отверстия равны между собой, однако по мере увеличения радиуса уменьшаются. При этом тангенциальные напряжения превышают радиальные. На внешней цилиндрической стороне диска сплошного сечения тангенциальные напряжения составляют 42,5% [11] от радиальных напряжений на оси вращения диска (рисунок 1.6, б).

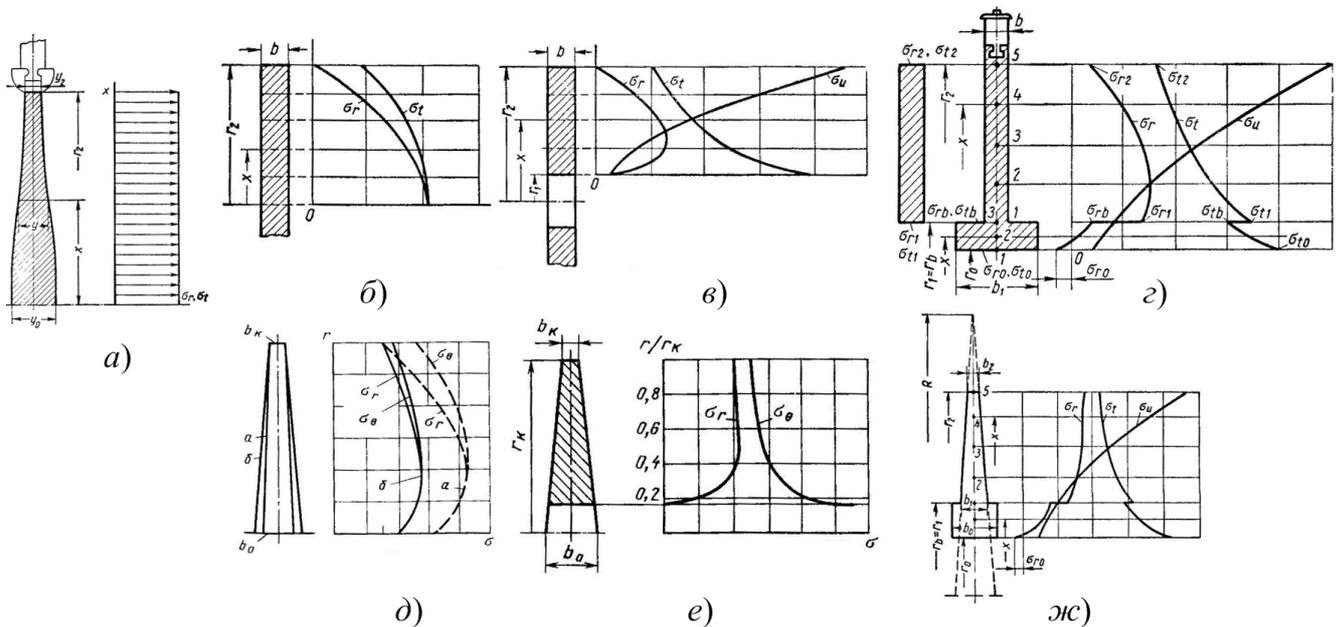


Рисунок 1.6 – Форма полотна и распределение напряжений вдоль радиуса дисков: равного сопротивления (а), постоянной толщины (б, в, г) и конического (д, е, ж); сплошного – б), д), с отверстием – в), е), с цапфами – г), ж)

Так как наибольшие напряжения возникают вблизи оси вращения диска и превосходят напряжения на внешнем контуре диска, то по ним определяют запас прочности диска.

Другой распространенной конструкцией дисков являются диски с осевым отверстием, наличие которого необходимо для соединения дисков с валом или осью (рисунок 1.6, в, е). Необходимость осевого отверстия и его размеры определяются общей компоновкой узла и всего устройства в целом.

Распределение напряжений в диске постоянной толщины с осевым отверстием (рисунок 1.6, в) отличается от распределения напряжений в диске без осевого отверстия. Вблизи отверстия возникает концентрация напряжений, которая снижает несущую способность диска. Осевое отверстие увеличивает тангенциальные напряжения вблизи отверстия более чем в два раза по сравнению с тангенциальными напряжениями на оси вращения диска сплошного сечения без осевого отверстия. С увеличением радиуса осевого отверстия от малого до предельно большого, тангенциальные напряжения вблизи отверстия увеличиваются примерно на 20% [11], [12].

Применение дисков с цапфами (рисунок 1.6, г, ж) позволяет выполнить диск и вал как одно целое и исключить операции изготовления отдельно вала и диска, а также сборки их в один узел. При необходимости закрепления диска на валу консольно, цапфу формируют с одной его стороны.

При наличии отверстия в диске одним из способов уменьшения тангенциальных напряжений вблизи отверстия является утолщение части полотна диска вблизи отверстия, или развитие ступицы с плавным переходом от полотна диска к ступице. Кроме того, необходимость утолщения части полотна диска вызвана требованием надежного соединения диска с валом или осью при применении шлицевого, шпоночного соединения, а также при посадке диска с натягом на вал или ось. Для снижения пикового напряжения на контуре отверстия, диски выполняют со ступицей определенных размеров (рисунок 1.7). Для уменьшения тангенциальных напряжений осевые и радиальные размеры

ступицы выбирают из условий получения приемлемых величин тангенциальных напряжений, обеспечения необходимой жесткости.

При короткой ступице тангенциальные напряжения могут в 1,5 раза превышать максимальные напряжения в средней части полотна диска. При удлиненной ступице в том же диске пиковое напряжение почти равно максимальному. Ступица также влияет на общий характер распределения напряжений в диске, но в средней и периферийной частях полотна это влияние незначительно. Таким образом, подбором размеров ступицы можно оптимизировать распределение напряжений в диске и уменьшить пиковое значение на контуре отверстия.

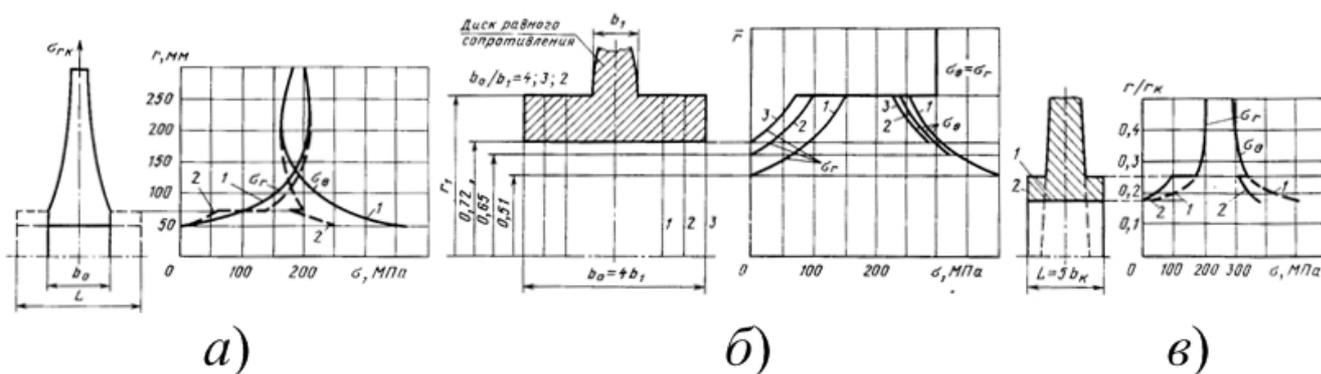


Рисунок 1.7 – Влияние размеров ступицы на распределение напряжений в диске гиперболической формы (а), равного сопротивления (б) и конической формы (в)

Распространенным типом соединения дисков с валом или осью, обеспечивающим взаимную неподвижность соединяемых деталей, является цилиндрическое соединение с натягом (рисунок 1.8). Взаимная неподвижность соединяемых деталей обеспечивается силами трения, возникающими на поверхности контакта деталей. Такое соединение дает возможность воспринимать большие статические и динамические нагрузки без ослабления соединения.

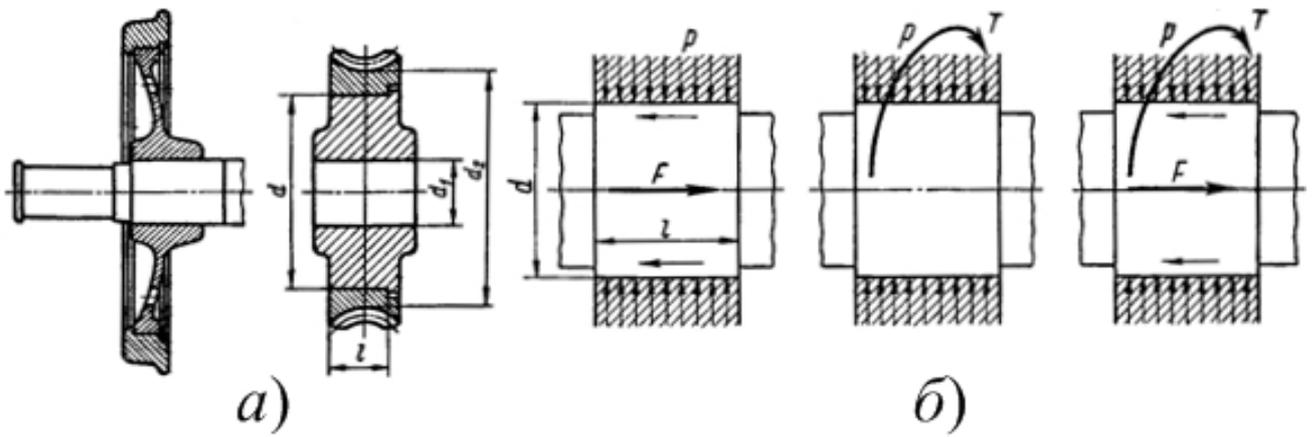


Рисунок 1.8 – Цилиндрическое соединение с натягом (а) и схема нагружения соединения (б)

При нагружении осевой силой  $F$  должно выполняться следующее условие [3]:

$F \leq f \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot p$ , откуда требуемое давление на поверхности контакта

$$p \geq \frac{F}{f \cdot \pi \cdot d \cdot l}.$$

При нагружении соединения крутящим моментом  $T$  необходимо чтобы

$$T \leq \frac{f \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot p \cdot d}{2}, \text{ откуда}$$

$$p \geq \frac{2 \cdot T}{f \cdot \pi \cdot d^2 \cdot l}.$$

При нагружении соединения одновременно осевой силой  $F$  и крутящим моментом  $T$ , должно быть

$$\sqrt{F^2 + \left(\frac{2 \cdot T}{d}\right)^2} \leq f \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot p, \text{ откуда}$$

$$p \geq \frac{\sqrt{F^2 + \left(\frac{2 \cdot T}{d}\right)^2}}{f \cdot \pi \cdot d \cdot l},$$

где  $f$  – коэффициент трения,

$d$  и  $l$  – диаметр и длина посадочной поверхности, в соответствии с рисунком 1.8, б.

Так как в быстровращающихся соединениях давление на посадочной поверхности деталей может быть ослаблено центробежными силами, действующими на детали, то для обеспечения надежности этих соединений натяг контактной поверхности увеличивают с учетом действующих центробежных сил.

Расчетное усилие натяга  $N_p$  в цилиндрическом соединении связано с давлением  $p$  следующей зависимостью:

$$N_p = p \cdot d \cdot \left( \frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right), \text{ где}$$

$$C_1 = \frac{1 + \left( \frac{d_1}{d} \right)^2}{1 - \left( \frac{d_1}{d} \right)^2} - \mu_1; \quad C_2 = \frac{1 + \left( \frac{d}{d_2} \right)^2}{1 - \left( \frac{d}{d_2} \right)^2} + \mu_2,$$

где  $d$  – посадочный диаметр;

$d_1$  – диаметр отверстия охватываемой детали (для валов сплошного сечения  $d_1 = 0$ );

$d_2$  – наружный диаметр охватывающей детали;

$E_1$  и  $E_2$  – модули упругости материалов охватываемой и охватывающей деталей;

$\mu_1$  и  $\mu_2$  – коэффициенты Пуассона материалов охватываемой и охватывающей деталей.

Для охватывающей детали опасными являются точки ее внутренней поверхности. Для этих точек (рисунок 1.9) радиальное  $\sigma_r$  и тангенциальное  $\sigma_t$  нормальные напряжения определяются по формулам:

$$\sigma_r = -p; \quad \sigma_t = \left( \frac{1 + \left( \frac{d}{d_2} \right)^2}{1 - \left( \frac{d}{d_2} \right)^2} \right) \cdot p.$$

В этих точках возникает плоское напряженное состояние, при этом главные напряжения  $\sigma_1 = \sigma_t$ ;  $\sigma_2 = 0$ ;  $\sigma_3 = \sigma_r$ .

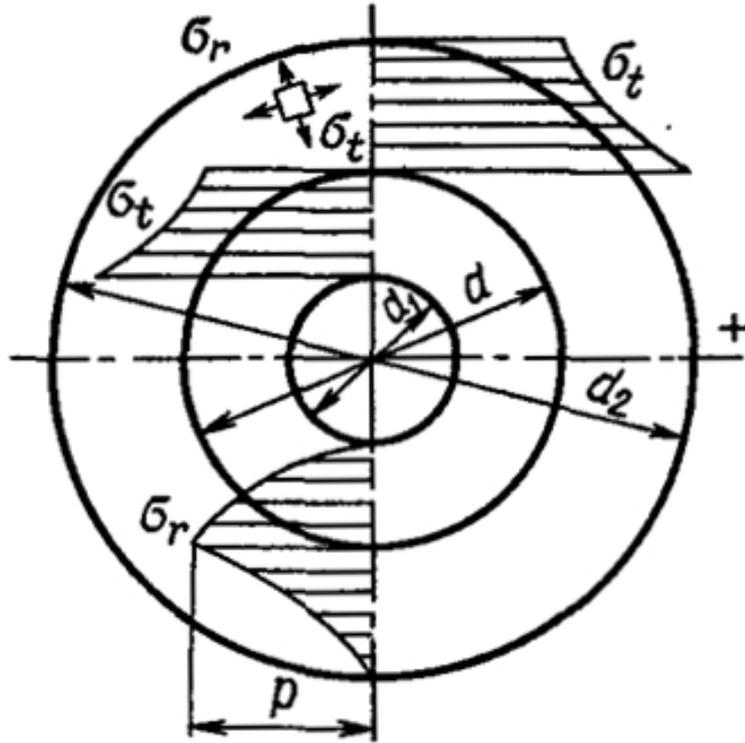


Рисунок 1.9 – Распределение напряжений в соединении с натягом

Для охватываемой детали из пластичного материала по гипотезе наибольших касательных напряжений (третьей теории прочности) должно выполняться условие

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2 \cdot p}{1 - \left(\frac{d}{d_2}\right)^2} \leq [\sigma_p].$$

На основании практических данных установлено, что цилиндрические соединения с натягом могут быть вполне надежными даже при появлении на внутренней поверхности охватываемой детали пластических деформаций [3].

Помимо нагрузок, действующих на диски в радиальном и тангенциальном направлениях, действуют также и осевые нагрузки.

Осевые силы создают изгиб дисков. Возникающие при этом напряжения изгиба зависят от профиля диска, от способа соединения дисков между собой и с валом или осью, от распределения давления вдоль радиуса диска и других конструктивных особенностей.

На вращающийся диск действуют радиальные инерционные силы, возникающие от собственной массы дисков, а также от массы деталей, закрепленных на диске (таких, например, как турбинные лопатки). Лопатка, закрепленная на диске, при окружной скорости на среднем радиусе лопаточной части в 300-400 м/с создает растягивающую диск силу, в  $20-30 \cdot 10^3$  раз превышающую ее собственную массу. Например, лопатка, обладающая массой в 0,5 кг, создает радиальную силу в 100-150 кН. На диске обычно размещается несколько десятков лопаток, таким образом, общая радиальная нагрузка на диски достигает нескольких тысяч килоньютонеров [12].

Нагрузки, действующие на железнодорожные колеса можно определить исходя из допускаемой нагрузки от оси на рельсы, которая составляет до 300 кН на отечественных дорогах и превышает 300 кН на некоторых зарубежных [13], [14].

К числу основных факторов, ограничивающих надежность оборудования на эксплуатационных режимах, относятся нестационарные температурные и силовые воздействия (в том числе и рабочих сред) на элементы конструкции, что вызывает изменение их теплового состояния, переменные напряжения и малоцикловую усталость материала конструкции, а также вибрацию, деформацию элементов, относительные перемещения частей конструкции.

Термические напряжения в дисках могут возникнуть вследствие неравномерного распределения температуры (рисунок 1.10).

Диски в турбинах работают при температурах рабочей среды (пара, газа) до 750 °С [15]. Нагрев до таких температур вызван необходимостью повышения КПД установки, однако, ограничивается длительностью эксплуатации и свойствами материала дисков (рисунок 1.11).

Температура газов перед турбиной авиационных двигателей может достигать 950-1030 °С для неохлаждаемых лопаток и 1030-1330 °С для охлаждаемых лопаток [16].

Наиболее опасными режимами, которые могут привести к поломке дисков и выходу из строя всей установки являются режимы пуска и неустановившиеся режимы работы.

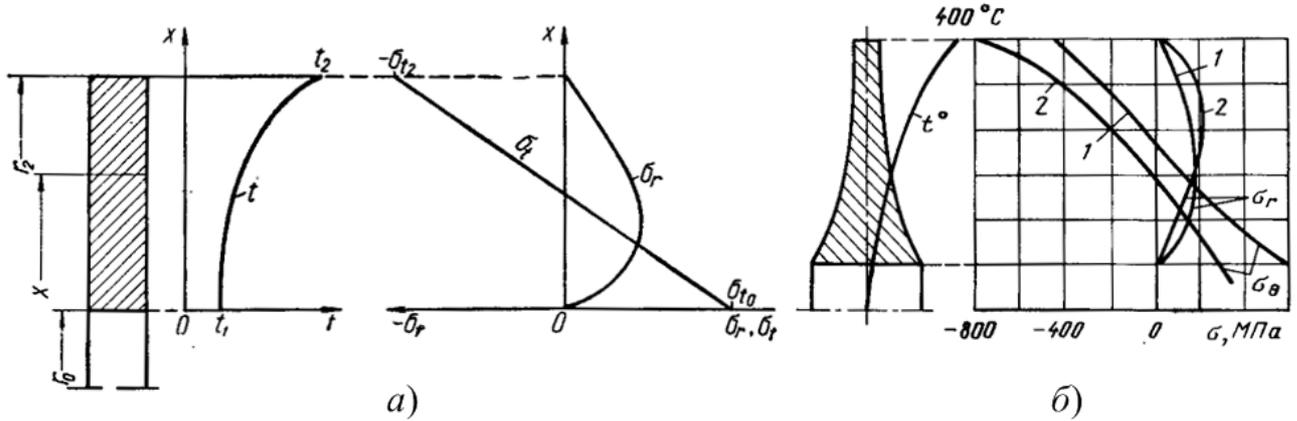


Рисунок 1.10 – Распределение температурных напряжений в дисках постоянной толщины (а, б – позиция 1), гиперболического профиля (б – позиция 2)

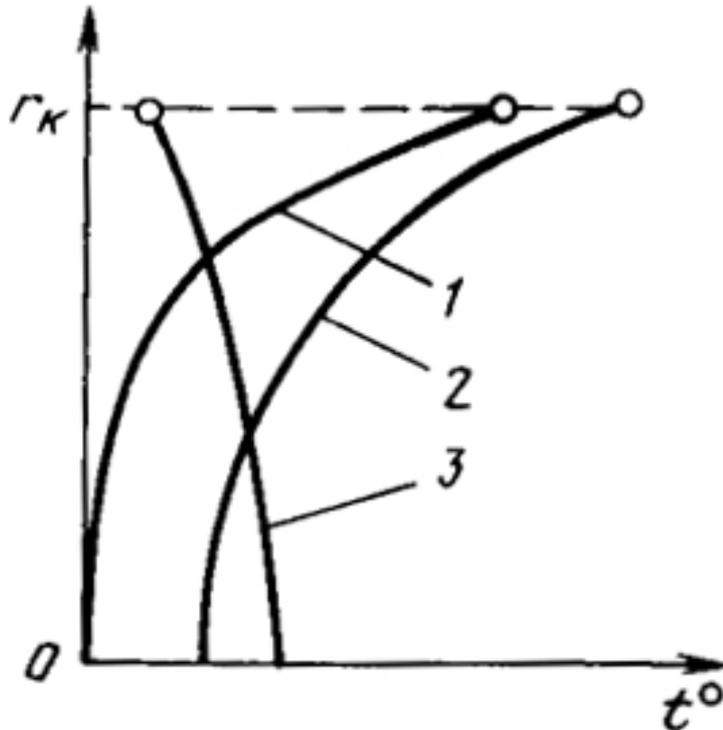


Рисунок 1.11 – Распределение температур по радиусу диска при различных режимах работы газотурбинного двигателя. 1 – режим пуска, 2 – рабочий режим, 3 – режим после остановки двигателя.

Температура дисков может достигать до 800-850 °С на ободе и до 550-650 °С у оси вращения. В процессе нагрева перепад температур по радиусу (сечению) диска возрастает достигая максимума и может составлять 250-350 °С (рисунок 1.12) [15], [16], [17], [18], [11], [12].

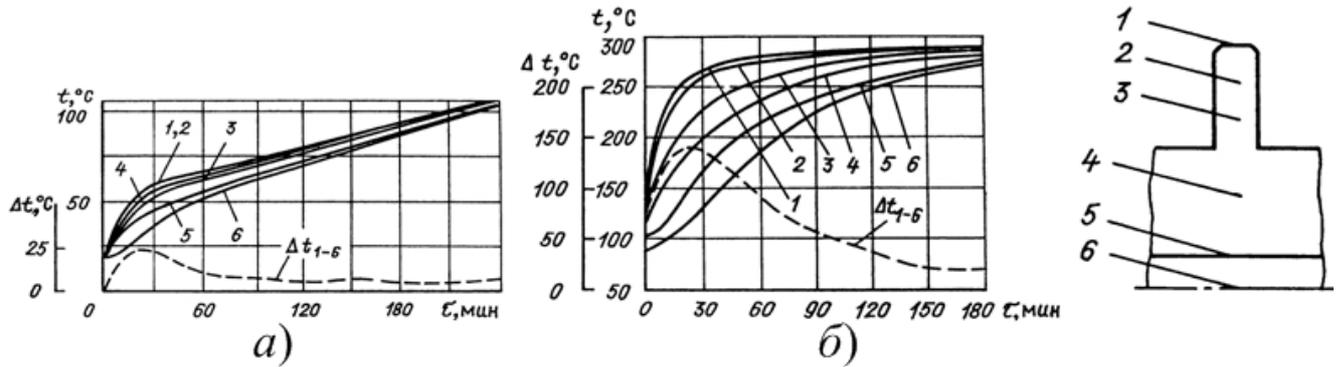


Рисунок 1.12 – Прогрев диска I ступени ротора ЦСД турбины К-300-240 ЛМЗ на валоповороте (а) и при частоте вращения 1400-1800 об/мин с подачей греющего пара (температура 300 °С) в переднее концевое уплотнение (б)

Конструктивная прочность дисков определяется сочетанием определенного предела текучести с высокой пластичностью. Кроме того, оценка конструктивной надежности производится по характеристикам ползучести и длительной прочности, склонности к тепловой хрупкости, сопротивляемости коррозии (при соответствующем воздействии химически активных сред).

Требования к механическим свойствам поковок дисков регламентируются техническими условиями и стандартами, принятыми в соответствующих отраслях машиностроения.

## 1.2 Технологические процессы получения дисков

В настоящее время известны способы изготовления дисков, которые включают процессы литья, обработки давлением и механической обработки металла.

Литьем изготавливают преимущественно колесные центры [19] для составных железнодорожных колес, отливки для изготовления шестерней и зубчатых колес. Данный способ позволяет получать изделия практически любых форм и типоразмеров. Управление структурой изделий осуществляют путем термической обработки, что не всегда дает наилучшие результаты по сравнению с другими способами производства.

Наиболее приближенные по форме и размерам к конечному изделию заготовки для изготовления дисков получают штамповкой (рисунок 1.13) [20]. Штамповку осуществляют на штамповочных молотах и прессах (кривошипных, гидравлических).

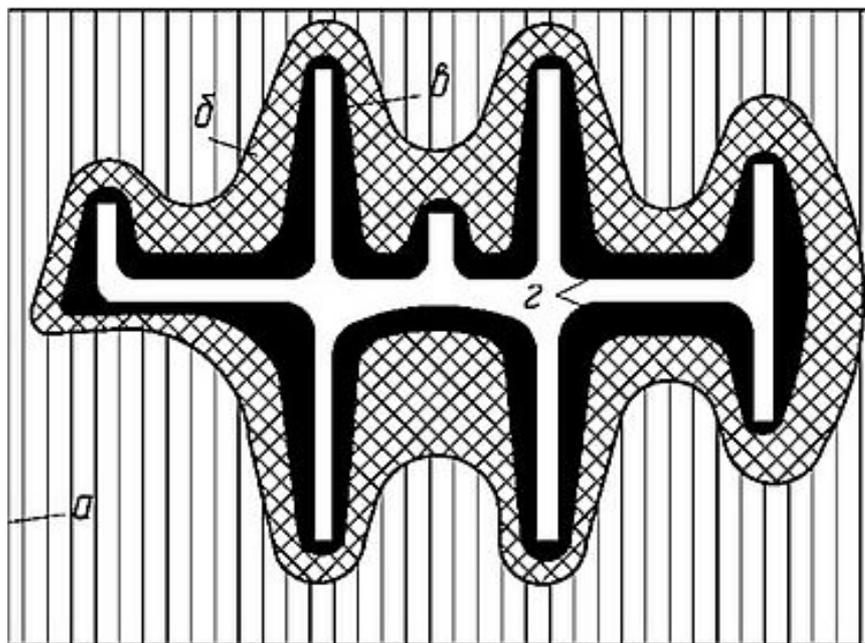


Рисунок 1.13 – Контуры поковки, полученные ковкой (а), предварительной (черновой) штамповкой (б), штамповкой обычной точности (в) и точной штамповкой (г)

Штамповкой получают поковки дисков сложной конфигурации и массой до 400 кг. Для штамповки крупных дисков требуются уникальные прессы усилиями сотен меганьютонов.

Одним из путей уменьшения усилия деформирования при штамповке является секционное деформирование [21], [22], когда заготовку деформируют последовательно по отдельным участкам за несколько ходов прессы, что позволяет снизить усилие деформирования более чем в три раза [23]. Однако, на заготовке могут образоваться зажимы по границам обжимаемых участков (рисунок 1.14).

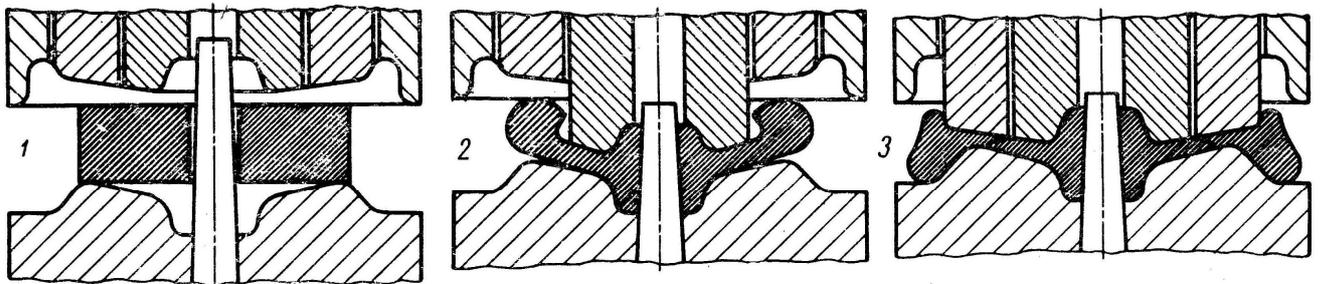


Рисунок 1.14 – Сема секционного деформирования

Диски можно получить гидростатической [24], изотермической [25], двусторонней штамповкой [26], ротационным деформированием, раскаткой, а также кузнечными технологиями, к числу которых относят осадку сплошными бойками и бойками, имеющими осевые отверстия, а также разгонку.

Из перечисленных некузнечных процессов рассмотрим процесс раскатки дисков [27], [28] (рисунок 1.15): штампованную заготовку раскатывают одной или двумя парами роликов. Во многом эта схема аналогична известному [29], [30], [31], [32], [33] процессу раскатки колес, но имеет ряд особенностей.

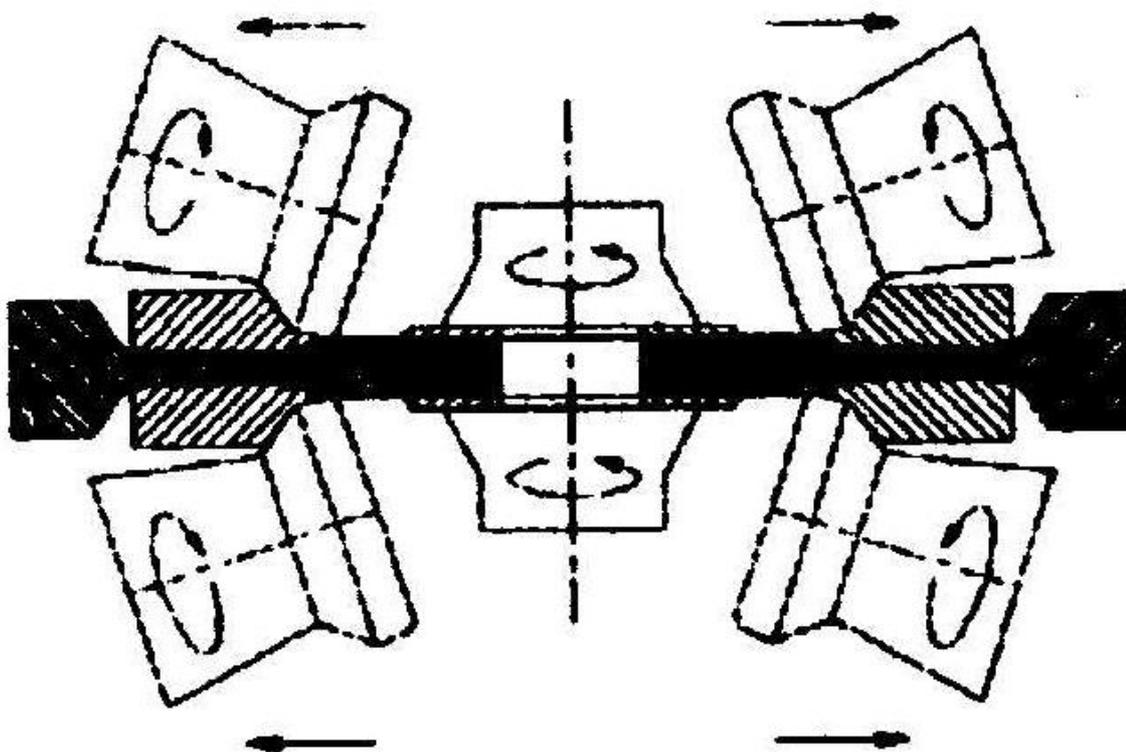


Рисунок 1.15 – Схема ротационной раскатки диска

При помощи ротационной раскатки дисков возможно получение изделий с уменьшенными припусками по сравнению с объемной штамповкой, а также уменьшение энергоемкости процесса за счет снижения рабочего усилия.

Станы для изотермической раскатки – СРД-800 и АДР-800, позволяют получать диски диаметром до 800 мм с толщиной полотна от 10 до 100 мм и максимальной высотой цапфы и спрофилированных участков до 150 мм.

### 1.2.1 Операции кузнечных технологий при изготовлении дисков

Осадка – технологическая операция, при которой увеличивается сечение заготовки, перпендикулярное к действующей силе, и уменьшается размер по высоте. Рабочий инструмент полностью перекрывает заготовку [1] (рисунок 1.17).

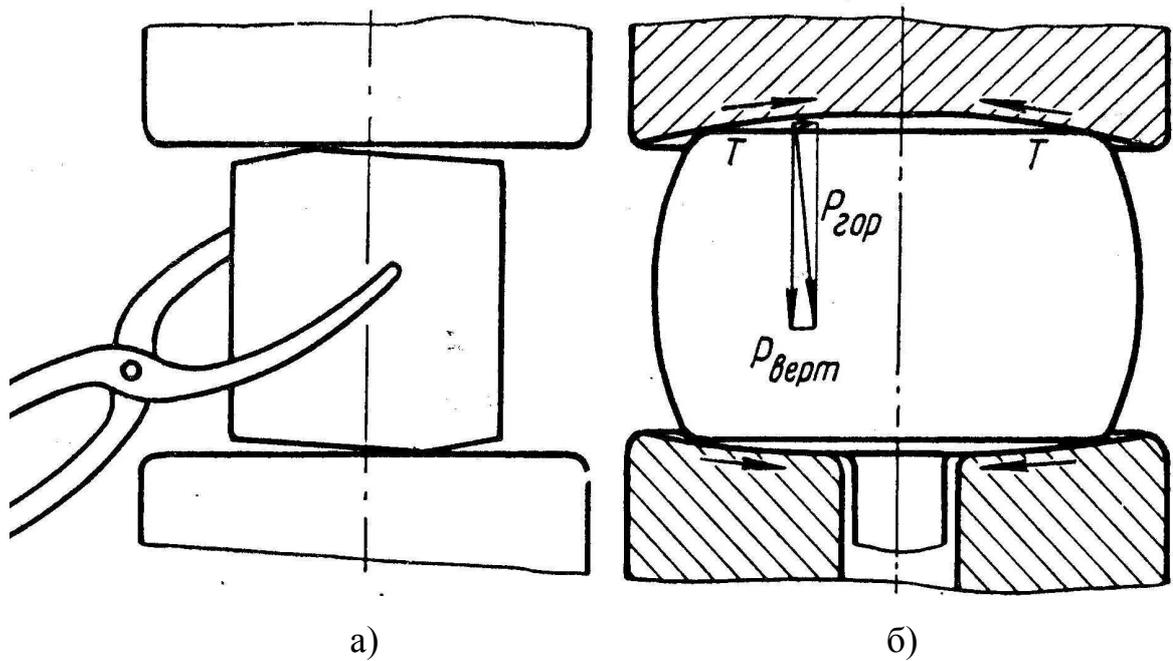


Рисунок 1.17 – Схема осадки заготовки (а) и слитка (б)

При осадке получается радиальное расположение волокон. Во избежание потери устойчивости заготовки при осадке, соотношение высоты к диаметру заготовки не должно превышать 2,5.

Разгонка предназначена для местного уширения заготовки.

Разгонку выполняют по кругу обычно вплотную к цапфам при круговых подачах [1] (рисунок 1.18): с перекрытием части очага деформации предыдущего обжата (рисунок 1.18, а), с веерной разгонкой (рисунок 1.18, б), разгонкой полотна диска плоскими бойками [34] (рисунок 1.18, г).

В конструкции разгоночного инструмента (рисунок 1.19) плавающие бойки расположены диаметрально, но каждый из них (верхний и нижний) состоит из двух частей, перемещающихся радиально от оси диска, и растягивающих пружин.

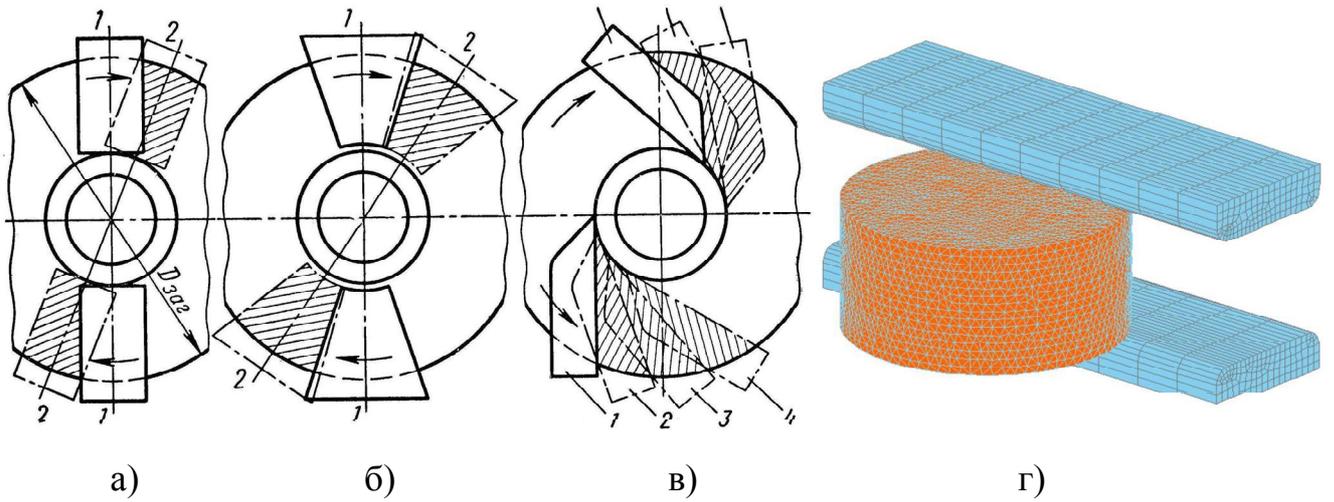


Рисунок 1.18 – Схема разгонки полотна диска. 1-4 – номера обжатий

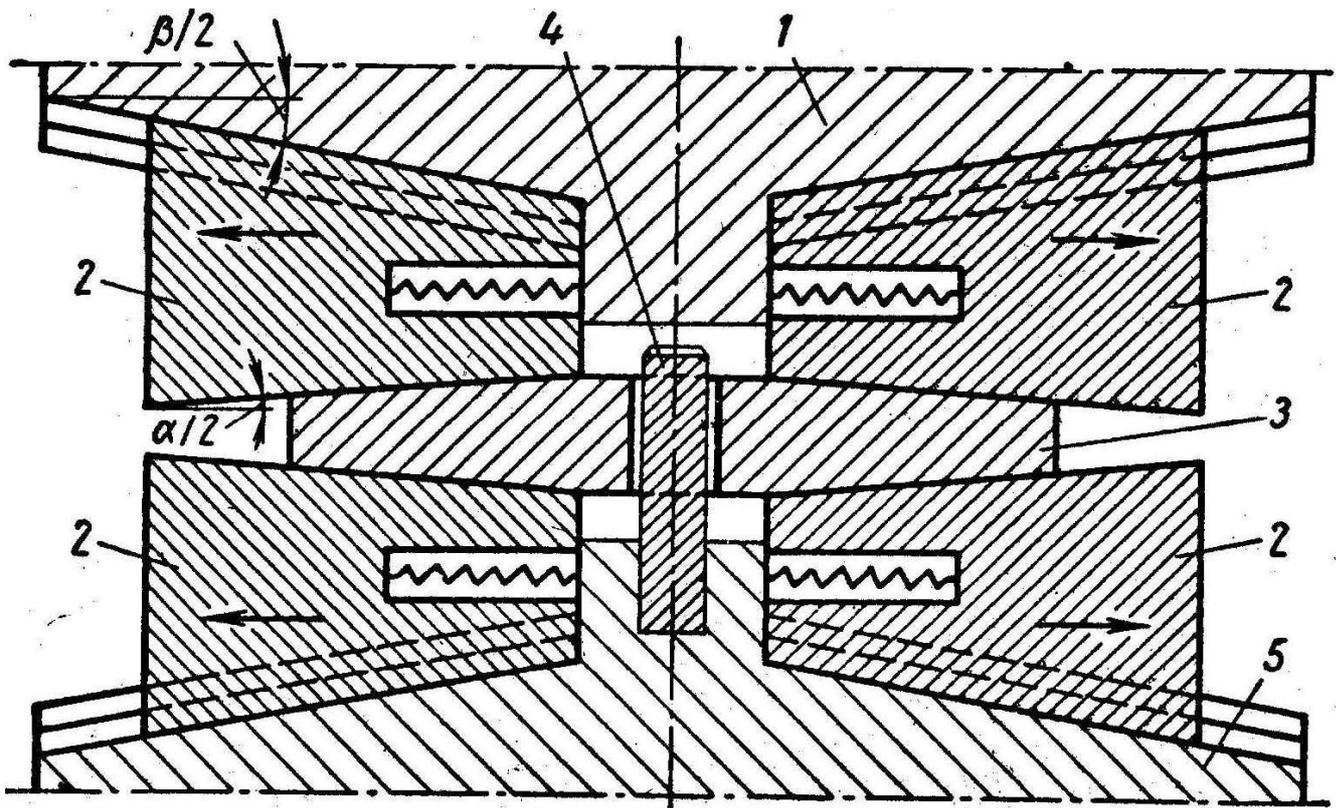


Рисунок 1.19 – Схема конструкции инструмента с «плавающими» бойками для разгонки

В ходе осадки элементы макростроения заготовки (слитка): несплошности, неметаллические включения могут раскрыться в радиальном направлении, развиваются в плоскости, перпендикулярной оси заготовки и перераспределяются в полотно диска [35], [36], [37] (рисунок 1.20), что в свою очередь приводит к неравномерному распределению механических свойств металла изделия по сечению и в различных направлениях.

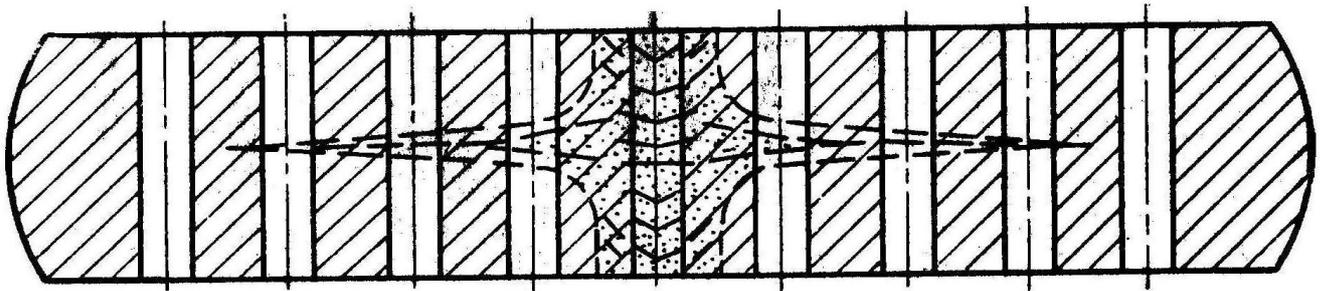


Рисунок 1.20 Перераспределение в объеме поковки диска элементов макростроения осевой зоны слитка после осадки

Осадка кольцами. Изготовление поковок дисков с цапфами возможно с применением уникальной кузнечной операции, сочетающей элементы свободнойковки и объемной штамповки – осадки заготовок инструментом, имеющим осевые отверстия (рисунок 1.21). Одно из первых серьезных описаний этого процесса содержится в литературных источниках, относящихся к 1932-1938 годам [38], [39].

Процесс осадки бойками с осевым отверстием характеризуется тем, что помимо пластических потоков металла, действующих в радиальном направлении, действуют пластические потоки металла в осевом направлении в отверстия бойков. Таким образом, за один рабочий ход могут быть сформированы и полотно диска, и цапфы.

Осадка заготовок бойками с осевым отверстием может быть применена как основная деформирующая операция [40], [41], [42], [43], [44] при изготовлении

поковок дисков с цапфами, однако ее применение в качестве основной операции ограничено, отчасти, из-за недостаточной изученности процесса.

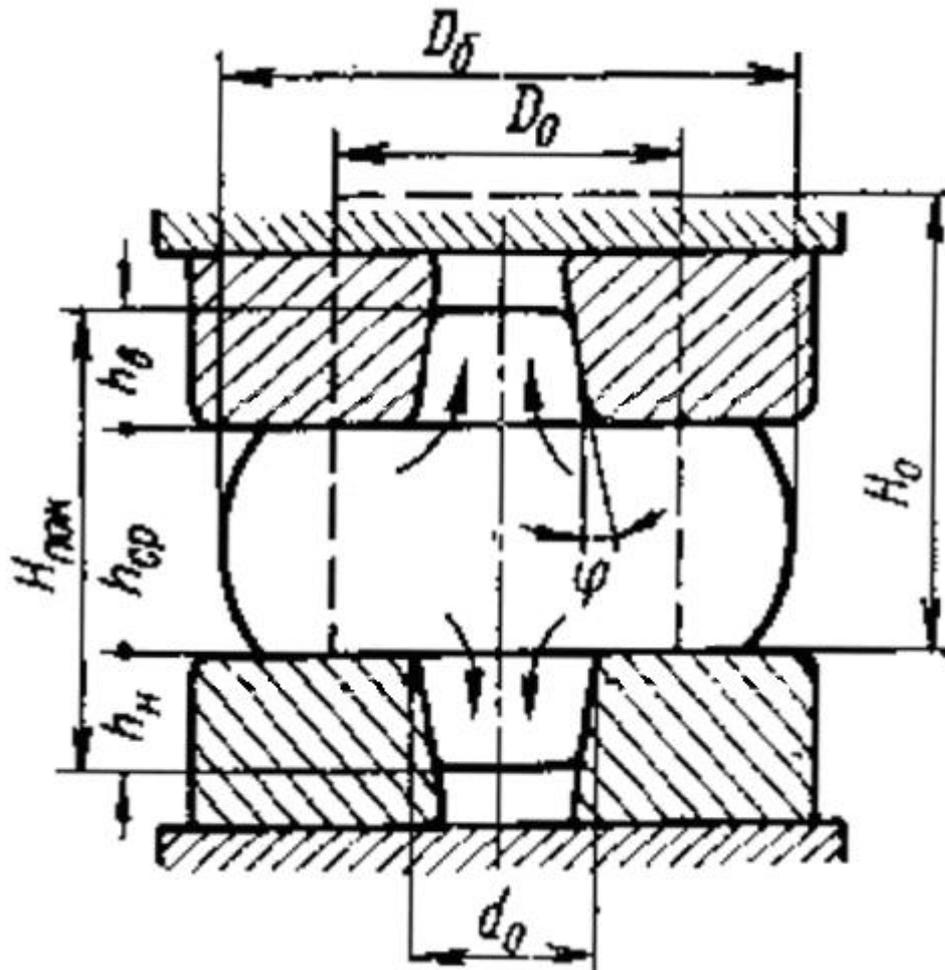


Рисунок 1.21 – Схема осадки бойками с осевым отверстием

При изготовлении поковок дисков с цапфами, инструмент с осевым отверстием находит применение при дополнительных операциях деформирования [45], [46]. Так подкладные кольца применяют при осадке заготовок и разгонке полотна диска (рисунок 1.22). Подкладные кольца применяют также для окончательного формирования цапф и их калибровки на завершающих стадиях деформирования, которым предшествуют операции осадки и разгонки [47].

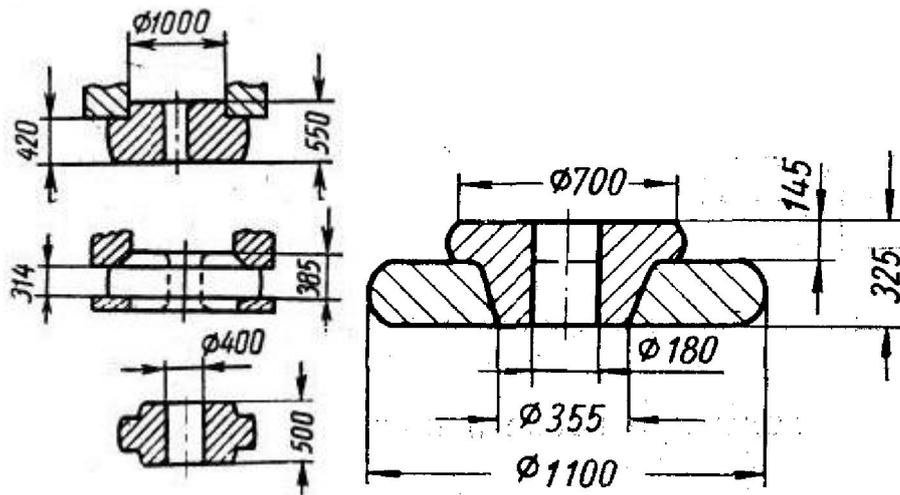


Рисунок 1.22 – Применение подкладных колец для вспомогательных операций  
КОВКИ

Кроме того, осадка бойками с осевым отверстием является эффективным средством управления потоками пластического течения металла, а также средством воздействия на элементы макростроения заготовки, такие как несплошности и неметаллические включения. Бойки с осевым отверстием применяют также и для выдавливания, например, дефектной осевой зоны слитка [1], предварительного формирования уступов на поковке, а также для предотвращения раскрытия или частичного или полного закрытия несплошностей заготовки [48].

### 1.3 Течение металла при осадке бойками с осевым отверстием

При построении технологического процесса, содержащего операцию осадки заготовки бойками с осевым отверстием необходимо знать или определить самостоятельно соотношения размеров и формы получаемой поковки и деформирующего инструмента, а также знать или/и прогнозировать влияние осадки бойками с осевым отверстием на структуру и механические свойства металла поковки. Определить упомянутые соотношения геометрических размеров и установить их влияние на структуру и свойства металла позволяет анализ течения металла в процессе деформирования, общее представление о котором изложено в работе [1]. Поверхности раздела потоков (критические поверхности) показаны на рисунке 1.23.

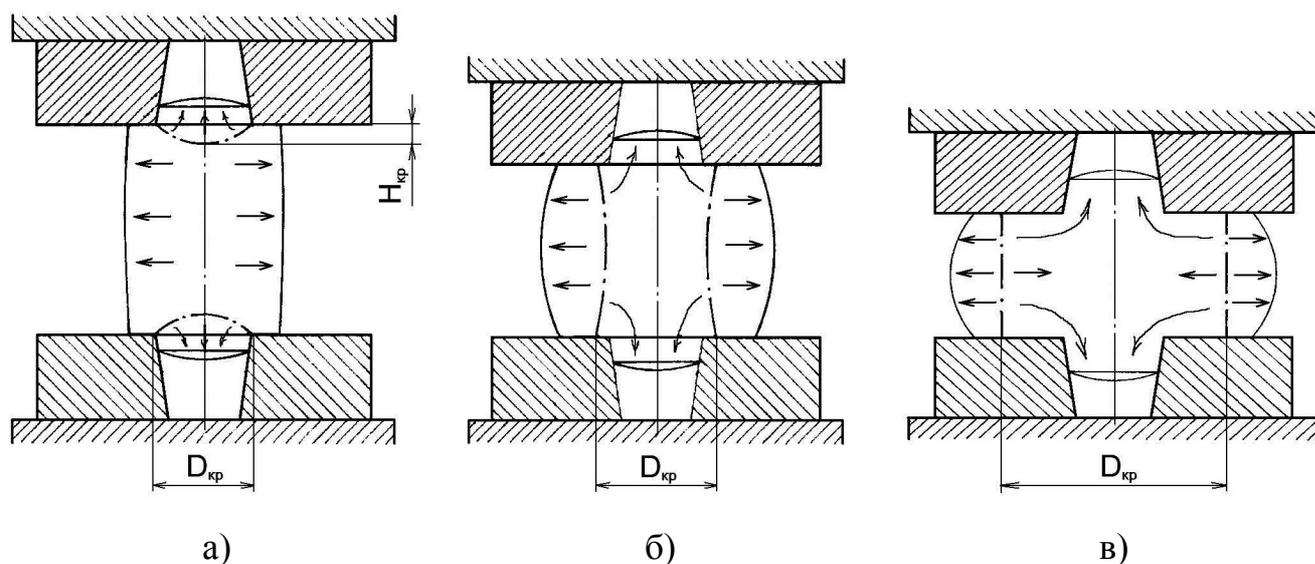


Рисунок 1.23 – Поверхности раздела пластических потоков при обжатии бойками с осевым отверстием: на начальном (а), промежуточном (б) и завершающем (в) этапе деформирования

В ряде работ [49], [50], [51], [52], [53] рассмотрен процесс осадки заготовок плоскими плитами с осевым отверстием только в одной из них – нижней. Такой процесс применяют при осадке слитков, а также при ковке изделий типа дисков с одной цапфой. Авторы упомянутых работ предложили считать заготовки

высокими ( $\frac{H_0}{D_0} > 1$ ) и низкими ( $\frac{H_0}{D_0} < 1$ ) на основе различного характера течения металла при осадке, когда в объеме заготовки появляется зона затрудненной деформации, расположенная вблизи отверстия в инструменте. Однако, в работе [52] эта зона обозначена как «очаг деформации при выдавливании». Общим для приведенных схем течения металла является наличие зоны затрудненной деформации и разделение объема заготовки прямолинейными нейтральными поверхностями. В работе [52] отмечена сложная форма поверхности раздела течения, но, тем не менее, предложено заменить ее цилиндрической (рисунок 1.24).

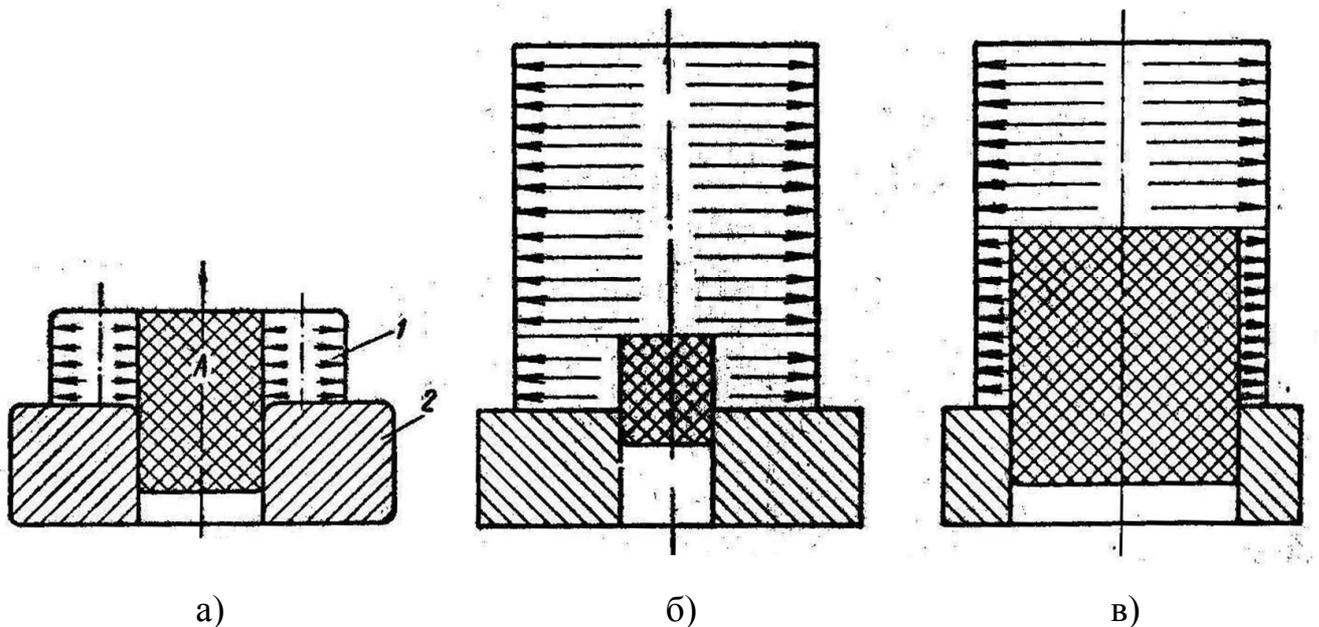


Рисунок 1.24 – Схемы направлений течения металла при осадке низких (а) и высоких (б), (в) заготовок на плоской плите с осевым отверстием

В работах [1], [54], [50], [55], [56], [57], [58], [48], [59], [60] изложены результаты дальнейшего изучения процесса осадки бойками с осевым отверстием, в частности, особенности течения металла. Одной из особенностей, отмеченных в работе [57], является то, что истечение металла в радиальном и осевом направлениях происходит из объема  $b c f i$  (рисунок 1.25), расположенного у входа в осевые отверстия бойков.

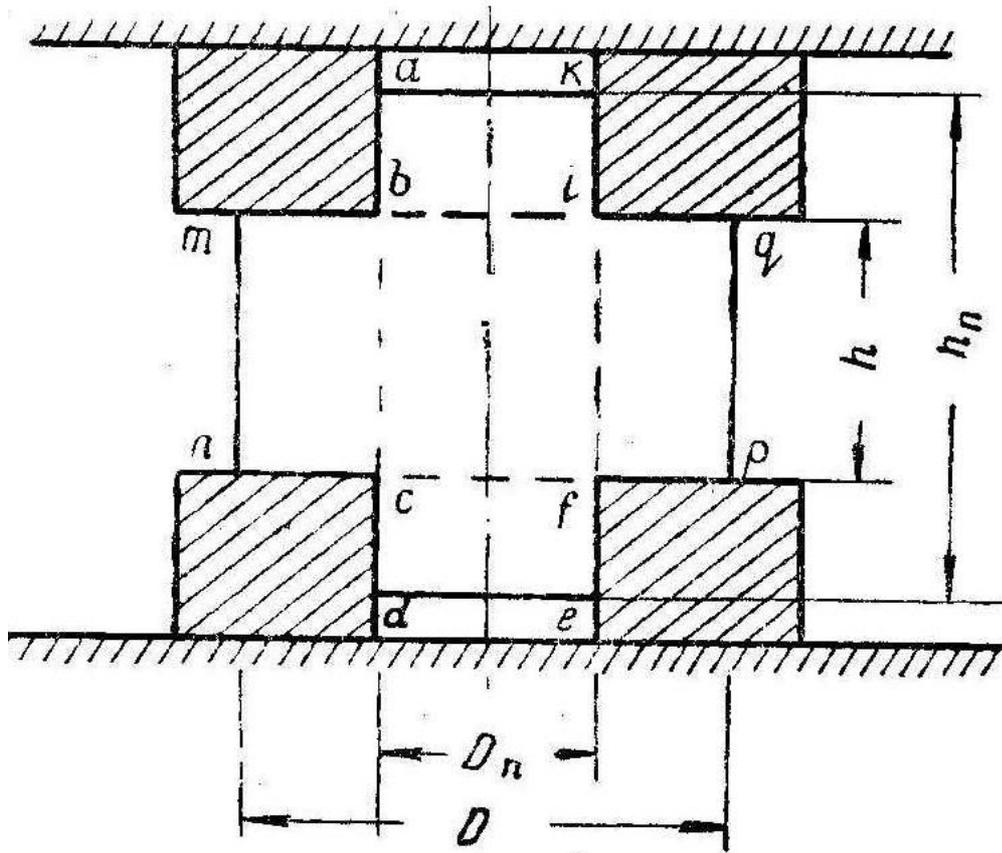


Рисунок 1.25 – Кинематическая схема истечения металла при ковке на подкладных кольцах (по Е.П. Унксову)

Однако, такой характер истечения не нашел экспериментального подтверждения.

Схема течения, предложенная А.Ф. Головиным [55], основанная на возможности положительного и отрицательного приращения высоты поковки в процессе обжатия, представлена на рисунке 1.26.

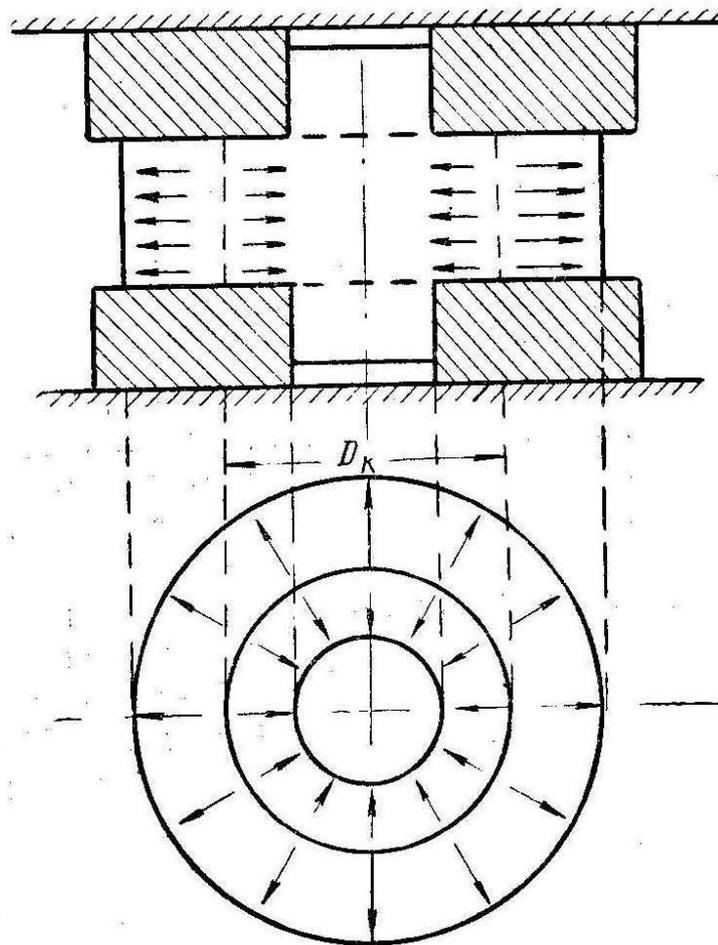


Рисунок 1.26 – Кинематическая схема истечения металла при ковке на подкладных кольцах (по А.Ф. Головину)

Уменьшение высоты поковки (отрицательное приращение высоты) означает, что металл из центральной части заготовки течет в периферийную, а увеличение высоты поковки (положительное приращение высоты) означает, что металл из периферийной части течет в центральную. А.Ф. Головин пришел к выводу, что в периферийной части заготовки (в полотне диска) существует критическая поверхность, являющаяся границей раздела течения металла.

И.Я. Тарновский, на основании проведенных опытов [60] установил, что следует разделять процесс осадки заготовок бойками с осевым отверстием на две стадии: на первой стадии осадки происходит уменьшение высоты поковки, на второй стадии осадки происходит увеличение высоты поковки. Однако, в [60] также указано, что при осадке «низких и широких цилиндров», первая стадия



В работе [61], посвященной разработке технологии изготовления крупногабаритных осесимметричных стальных изделий, в том числе дисков (с цапфами) и колес, приведена схема направления потоков металла при формовке заготовок (рисунок 1.28)

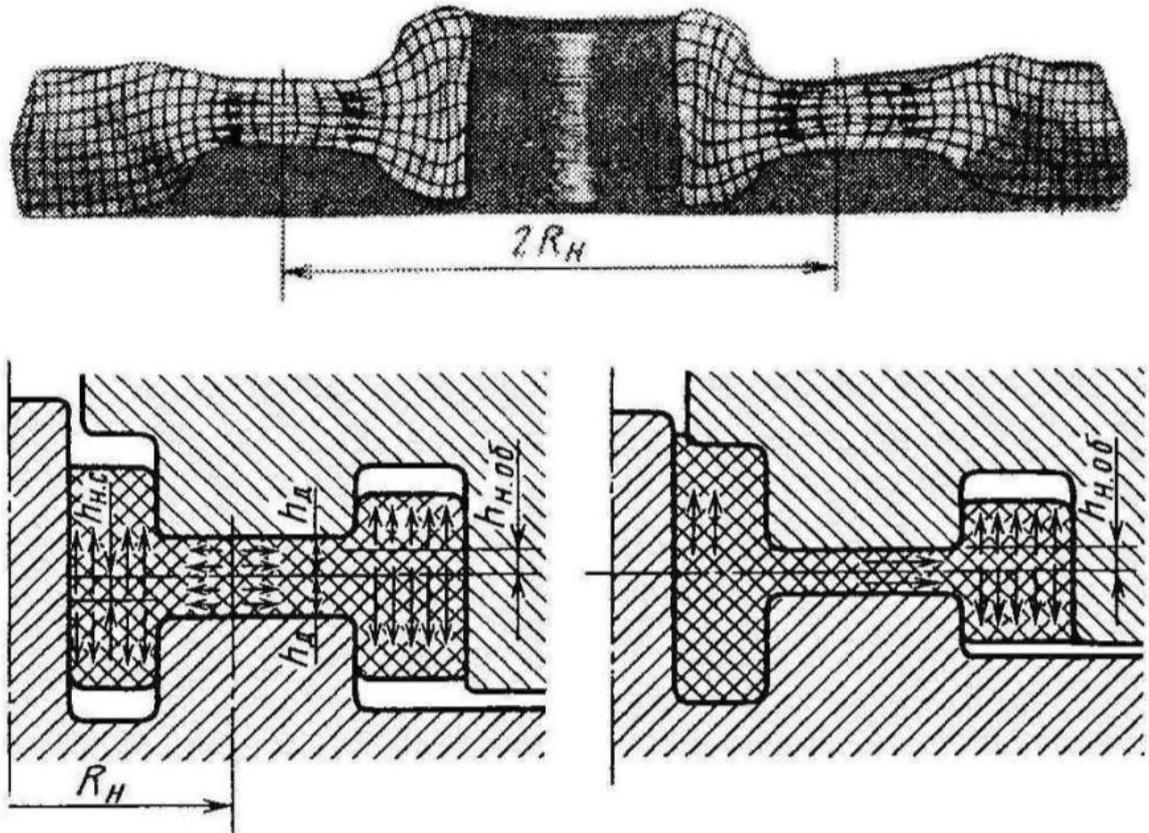


Рисунок 1.28 – Схема направления потоков металла при формовке колесных заготовок

Геометрическим местом раздела потоков металла в радиальном направлении является цилиндрическая нейтральная поверхность, а в осевом направлении – плоскость. Однако представленная схема отражает процесс формоизменения заготовки на стадии штамповки, оставляя вне рассмотрения стадию осадки, при которой металл может затекать в осевое отверстие штампа, а боковая поверхность при этом остается свободной, что является предметом нашего исследования.

В работе [59], основная цель которой – изучение формообразования заготовки, в частности профиля получаемой боковой поверхности (бочки) при осадке одним бойком с отверстием приведены поля скоростей в заготовке при осадке (рисунок 1.29).

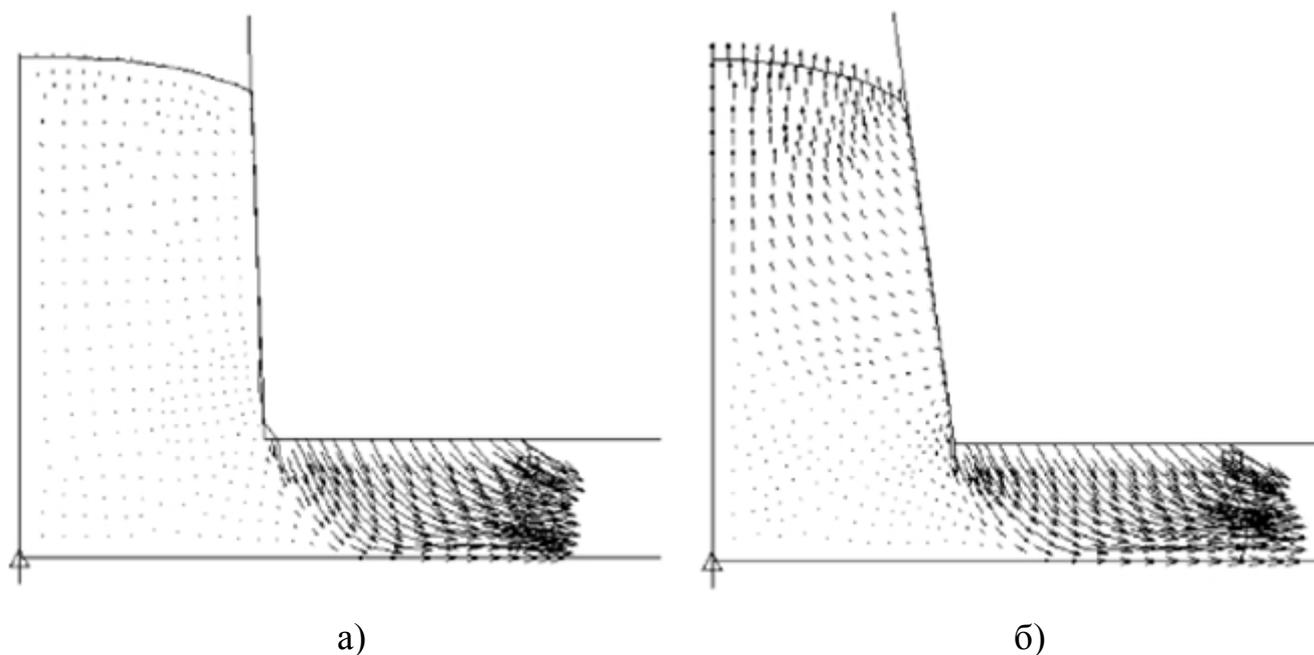


Рисунок 1.29 – Поля скоростей при осадке заготовки одним сплошным бойком и бойком с осевым отверстием с уклоном  $2^\circ$  (а) и  $8^\circ$  (б)

В данной работе варьировали соотношение высоты заготовки к ее диаметру, диаметр отверстия к диаметру заготовки, угол наклона стенки конической полости. Для получения результатов применены только расчетные методы, физический эксперимент не применяли. Полученные векторы смещения материальных точек, перемещающихся в отвести бойка и в межбойковое пространство, профиль боковой поверхности, а также искаженная деформацией координатная сетка получены также расчетными методами. Технологические факторы – соотношение высоты заготовки к ее диаметру, диаметр отверстия к диаметру заготовки – имеют узкий интервал 0,875-1,125 и 0,3-0,82 соответственно. Угол наклона в отверстии варьировали от  $2^\circ$  до  $8^\circ$ .

#### 1.4 Анализ полноты исследования механико-кинематических условий осадки бойками с осевым отверстием

Рассмотренные выше работы содержат большое количество сведений о процессе осадки заготовок бойками с осевым отверстием. Однако целостной картины, позволяющей получить полное представление о процессе, нет.

Из массива данных, полученных в результате исследований, можно выделить ряд ключевых особенностей процесса:

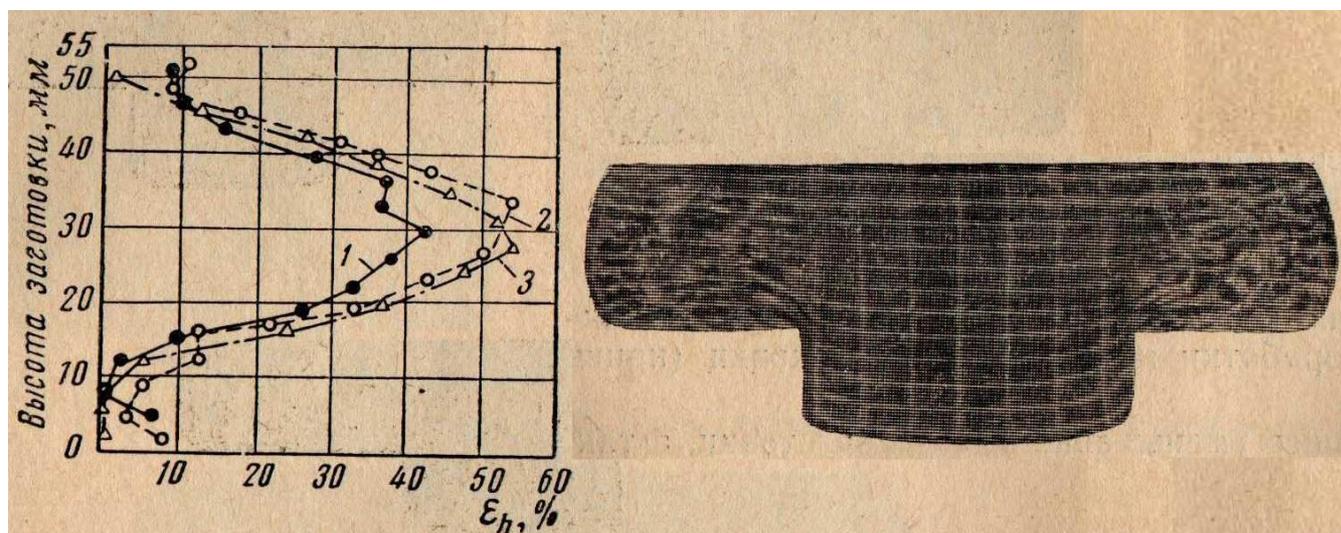
- изменение геометрических размеров заготовки в процессе деформирования имеет сложную закономерность в зависимости от соотношения геометрических параметров в системе «инструмент-заготовка». В частности, обжатие может сопровождаться как положительным, так и отрицательным приращением высоты заготовки. Однако четких границ такого изменения не установлено.

- профиль свободной боковой поверхности заготовки также может принимать сложную форму, например, выпуклая, вогнутая, двойная бочка. Причем в отличие от осадки заготовок плоскими сплошными бойками, зависимость от высоты заготовки (а точнее соотношения высоты заготовки к диаметру) явно не прослеживается.

- в ряде работ отмечается, что сложное формоизменение заготовки при осадке бойками с осевым отверстием вызвано потоками пластического течения, действующими в радиальном и осевом направлениях. То или иное формоизменение заготовки обусловлено величиной и направлением действующих потоков, а также местоположением и протяженностью границы раздела потоков. Представлен ряд кинематических схем, отражающих течение металла заготовки. Однако у авторов нет единого мнения о направлениях действия пластических потоков и положении границ раздела потоков.

В рассмотренных литературных источниках практически отсутствуют сведения о количественной оценке деформации по сечению осаживаемой заготовки, несмотря на проведенные авторами работ эксперименты по обжатию

заготовок с нанесенными координатными сетками. В работе [52] показано распределение деформаций по оси заготовки (рисунок 1.30).



а)

б)

Рисунок 1.30 – Распределение деформаций по оси (а) и координатная сетка в сечении заготовки, осажённой на плите с отверстием. 1-3 – степень обжатия 30, 50 и 70% соответственно

Представленное распределение деформаций носит такой же характер, как и при обжатии цилиндрических заготовок плоскими сплошными бойками, и не дает представления о деформации в остальном сечении заготовки.

Важным параметром для построения технологического процессаковки является зонообразование при деформировании заготовки. В проанализированных источниках крайне мало внимания уделено образованию зон деформации при осадке заготовок бойками с осевым отверстием. В работе [52] (рисунок 1.24) представлены схемы зон деформации только для осадки цилиндрических заготовок одним сплошным плоским и одним бойком с отверстием для двух соотношений высоты заготовки к ее диаметру и двух соотношений диаметра отверстия к диаметру заготовки. Однако зоны деформации представлены в виде цилиндров и колец, а граница раздела потоков пластического течения плоскостью и цилиндрической поверхностью.

## Выводы по аналитическому обзору литературы

1. На основе анализа условий эксплуатации дисков – изделий ответственного назначения – способы деформационного воздействия классифицированы по потокам и схемам кинематического течения, наиболее полно реализуемым при осадке заготовок бойками с осевым отверстием.

2. Ключевым параметром, определяющим эксплуатационные характеристики дисков и колес, является макроструктура металла.

3. Величина и распределение напряжений в диске зависят от формы полотна диска, наличия осевого отверстия и цапф, относительных размеров обода и угловых скоростей.

4. При осадке слитков элементы макростроения развиваются в плоскости, перпендикулярной оси заготовки и могут перейти в полотно диска.

5. Осадка бойками с осевым отверстием эффективна для управления потоками пластического течения металла и воздействия на элементы макростроения слитка.

6. Известные в литературе процессы формоизменения дисков и колес с разделом потоков металла остались вне рассмотрения течения металла в осевые отверстия, что является предметом настоящего исследования.

7. При осадке бойками с осевым отверстием может происходить как положительное, так и отрицательное изменение высоты заготовки, однако границы этого явления не установлены.

8. Боковая поверхность заготовки может принимать выпуклую, вогнутую или комбинированную форму, однако закономерности этих явлений не установлены.

9. В литературе отсутствует единое мнение о соотношении потоков пластического течения и положении нейтральных поверхностей и границах раздела потоков при осадке бойками с осевым отверстием.

10. Исчерпывающая количественная оценка местных деформаций в заготовке при осадке бойками с осевым отверстием отсутствует.

### 1.5 Задачи исследования

1. Исследовать течение материалов – пластические потоки, положение нейтральных поверхностей и границ раздела потоков при осадке бойками с осевым отверстием.
2. Разработать конструкцию заготовок, оснастки и методику эксперимента для исследования процесса осадки бойками с осевым отверстием.
3. Изучить механико-кинематические параметры процесса затекания материала в осевое отверстие бойков при осадке.
4. Установить режимы формообразования боковой поверхности поковки – выпуклой, вогнутой, комбинированной при осадке бойками с осевым отверстием.
5. Получить количественные данные о распределении местных деформаций в объеме заготовки при осадке бойками с осевым отверстием.
6. Установить конфигурацию и границы зон и очага деформации в заготовке при осадке бойками с осевым отверстием.
7. Определить режимы деформирования заготовки и установить количественные соотношения геометрических параметров системы «инструмент-заготовка» для заданного регулирования течения материала в составные элементы диска при осадке бойками с осевым отверстием.
8. Оценить адекватность моделирования процесса течения заготовок из пластилина.
9. Разработать технологию получения поковок типа дисков для промышленного применения результатов исследования.

## Глава 2 Методики исследования течения металла при ОМД

### 2.1 Знаки, фиксирующие местные деформации в заготовках

В диссертационном исследовании предполагается установить характер течения металла и динамику формоизменения в условиях конкретных геометрических соотношений очага деформации, величины обжатия, конфигурации исходной заготовки.

Признаки, характеризующие условия эксперимента:

- 1) горячая или холодная обработка;
- 2) пластическая обработка с удалением или без удаления металла;
- 3) форма заготовки или форма обработанной детали (пластина или плита, прутковый материал, массивное тело);
- 4) напряженное состояние в поковке в течение процесса формоизменения (простое или сложное);
- 5) тип внешнего усилия в процессе формоизменения (растягивающее, сжимающее, сдвигающее);
- 6) размеры области деформации (местная или общая);
- 7) формоизменение при устойчивом или неустойчивом состоянии;
- 8) низкие или высокие скорости деформации;
- 9) первичные или вторичные операцииковки.

Кинематические характеристики процесса можно измерить, поэтому исследование деформируемого состояния является основой почти всех экспериментальных методик.

Достаточно подробная классификация методов и приемов исследования процессов обработки металлов давлением изложена в работах [54], [37], [62] и [63].

Авторы указанных работ выделяют в экспериментальных методах три группы приемов исследования: 1) с физическим расчленением исследуемого

объекта; 2) с частичным нарушением сплошности объекта; 3) без физического расчленения объекта исследования.

Первая группа подразделяется на две подгруппы: а) объект исследования расчленяют физическим разрезом до деформации; рассеченные части затем сваривают, припаивают или просто соединяют (прижимают) друг к другу; б) рассечение объекта исследования производят после деформации. Промежуточное положение между подгруппами а) и б) занимают составные образцы: до деформации объект собирают (свинчивают, склеивают, сваривают) из отдельных частей, а после деформации разрезают.

Вторая группа включает приемы исследования течения металла на объектах с нарушенной сплошностью материала до такой степени, что разделения объекта на отдельные части не происходит. Сюда относятся: а) объекты с незаполненными полостями и несплошностями (сверлениями, отверстиями, заранее полученными трещинами); б) объекты с заполненными полостями (винтами, штифтами, прутками).

Третья группа объединяет несколько подгрупп приемов, которые частично можно отнести к первой или второй группе: а) исследование изменения геометрической формы и размеров объекта в процессе деформации; б) исследование изменения состояния покрытий на поверхностях объекта – искусственных (лак, тушь, эпоксидные смолы) или естественных (оксидные пленки); в) изучение деформационного искажения знаков (искусственных или естественных) на поверхностях объекта; г) исследование объемных знаков (залитой координатной решетки, состояния пор и рыхлостей, концентрации изотопов – методами рентгеновского анализа, ультразвукового контроля, регистрацией радиоактивного излучения).

Во всех методиках исследования применяют для фиксации местных деформаций так называемые знаки. Перечислим некоторые из них:

- 1) координатные сетки,
- 2) винты и штифты,
- 3) полученные механической обработкой отверстия в заготовке,

- 4) границы, образованные отдельными элементами составных образцов,
- 5) элементы структуры металла, выявляемые травлением,
- 6) покрытия на поверхности (в том числе следы механической обработки),
- 7) элементы структуры металла, выявляемые при рекристаллизации.

## 2.2 Выбор методов решения задач, поставленных в работе

В главе 1 было сформулировано 8 задач, которые надо решить в диссертационном исследовании. Из них 4 – качественные и 4 – количественные.

Качественные задачи – 1, 2, 6, 7, количественные – 3, 4, 5, 7, 8 (нумерация по тексту главы 1). Из перечисленных знаков 4), 5), 6), 7) подходят для решения качественных задач; 1), 2), 3) – для решения количественных задач.

Среди методов решения задач наиболее часто применяют методы слоистых заготовок, координатных сеток, оптические поляризационные методы, методы оптической анизотропии, макроструктурный метод, метод полей линий скольжения и метод конечных элементов.

Рассмотрим некоторые из них.

### 2.2.1 Количественные методы

Метод координатных сеток.

Данный метод следует считать наилучшим методом, в полной мере отражающим характер течения металла. Координатные сетки классифицируют по форме (нормальные сетки – система взаимно перпендикулярных линий, расположенных по направлениям главных нормальных напряжений и деформаций; касательные сетки – система взаимно перпендикулярных линий, расположенных по исходным направлениям наибольших касательных напряжений и сдвигов; система соприкасающихся окружностей; радиальные сетки – система лучей, исходящих из одной точки, и концентрические окружности; система параллельных линий), параметрам (микросетки – база сетки от 0,01 до 0,5 мм; макросетки – база сетки от 0,5 мм и выше до десятков миллиметров) и способу нанесения (нацарапывание и давление; накатывание сетки – валиками и способом шелкографии; фотопечатание; травление; напыление другими материалами; вставные сетки – листовые, из системы прутков или штифтов, а также образованные шариками). К данному методу

предъявляются следующие требования: нанесение сетки не должно вызывать повреждения заготовки. Сцепление сетки с заготовкой должно быть настолько прочным, чтобы в процессе она не стиралась; контур линий должен быть четким и сохраняться после пластической деформации; нанесение сетки не должно вызывать коррозии заготовки; толщина линий сетки должна быть минимальна; нанесение сетки должно быть простым в исполнении.

Для аналитической обработки экспериментальных данных, изучения конечных пластических деформаций по искажению сеток исследуемую заготовку разрезают до формоизменения по меридиональному сечению, на котором наносят сетку того или иного вида (рисунок 2.1). Далее получают изображение части заготовки с сеткой, соединяют части заготовки вместе и подвергают обжатию, как сплошную. После формоизменения заготовку разделяют по физическому соединению и получают изображение деформированной сетки.

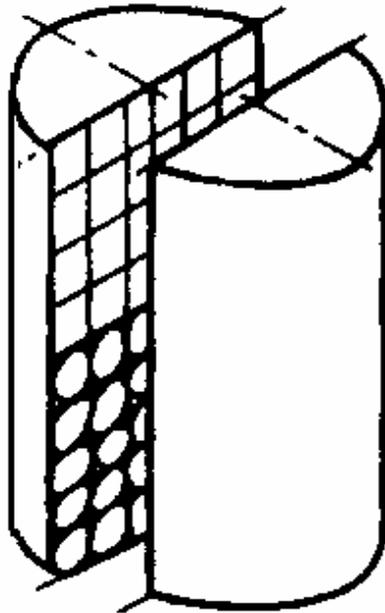


Рисунок 2.1 – Цилиндрическая заготовка с координатными сетками в продольной плоскости разъема

Винты и штифты.

О распределении деформаций можно судить и по изменению шага винта, ввернутого дезаксиально таким образом, что с осью симметрии объекта совпадает

образующая винта (рисунок 2.2, а) или по изменению диаметра штифта (рисунок 2.2, б).

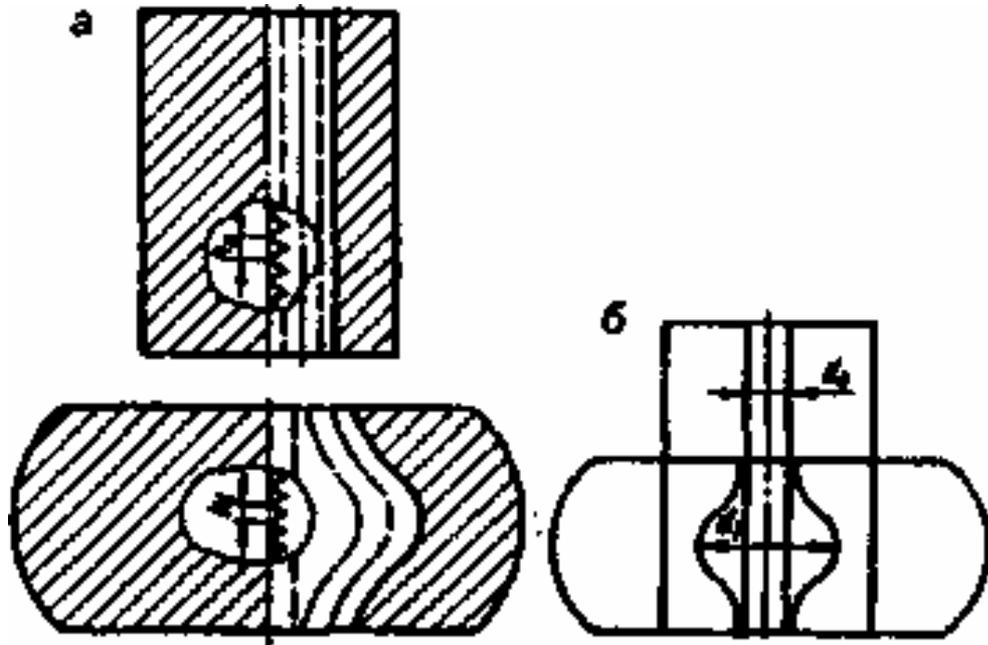


Рисунок 2.2 – Цилиндрические заготовки до и после осадки с размещенными в них винтом (а) и штифтом (б)

После разрезки деформированного объекта в плоскости, проходящей через оси винта и объекта исследования, можно наблюдать изменение шага винта по соответствующему направлению. Вдоль оси симметрии заготовки образующая винта остается прямолинейной. В. И. Залесский и А. В. Пузанчиков [54] предложили метод определения величины местной деформации по изменению диаметра штифта, помещенного в объект деформации. Винты и штифты могут изготавливаться как из того же материала, что и заготовка, так и из других материалов. В последнем случае достигается более четкое выявление границы штифта (винта) и основного металла в плоскости шлифа (например, методом травления). Данные методы исследования величин местных деформаций применяются для образцов и цилиндрических заготовок при осесимметричном деформировании.

Разновидностью метода исследования объекта со вставными элементами можно считать обжатие образцов с отверстиями, полученными механической обработкой расположенными в заготовке. Местные деформации оценивают по изменению объема полости отверстия (например, с помощью мелкого песка) или по изменению площади и размеров поперечного сечения.

Составные образцы и заготовки.

Такие образцы удобны тем, что при их осадке отдельные элементы прижаты друг к другу внешней силой, а силы трения между ними взаимно уравновешены. Такой составной образец ведет себя при осадке как сплошное тело. Иногда слоистые образцы скрепляют болтами, шпильками, изготавливают свинченными из концентрических труб с резьбой или из гаек, накрученных на стержень.

### 2.2.2 Качественные методы исследования

Вытравливание зон деформации.

Метод исследования основан на различной способности к травлению однородного металла в зависимости от степени местных деформаций: повышенной растворимостью в кислотах деформированного металла по сравнению с недеформированным (рисунок 2.3).

Однако не вся пластическая деформация выявляется травлением. Травлением обнаруживаются зоны только со значительными деформациями. Особенно затруднено травление зон деформации в чистых металлах.

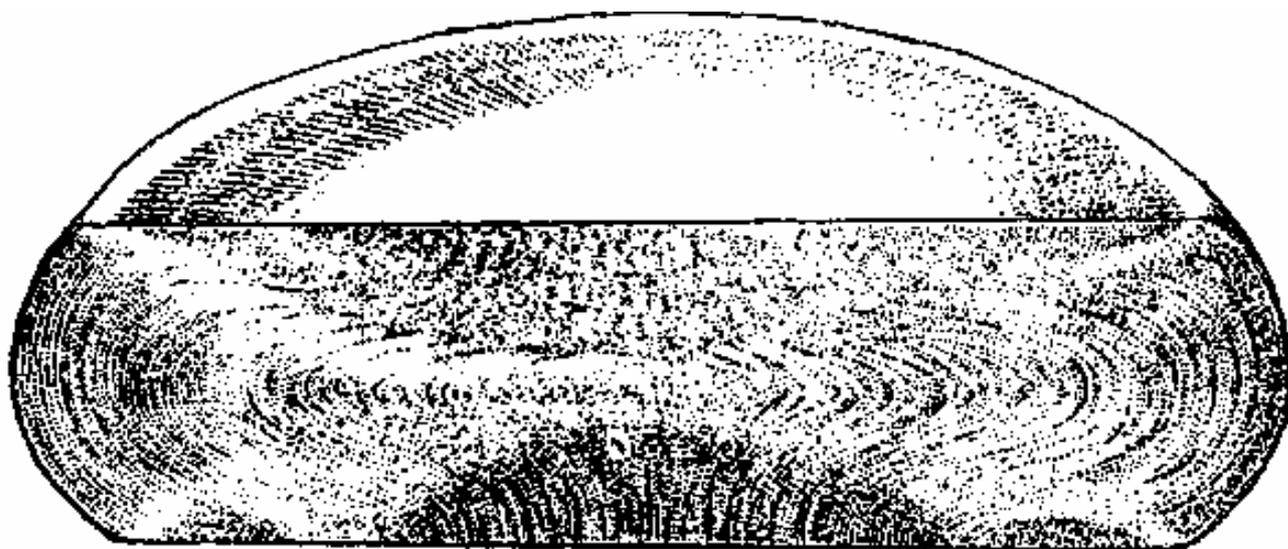


Рисунок 2.3 – Зоны деформации, вытравленные в поперечном (меридиональном) сечении цилиндрической осаженной заготовки

Поверхностно-оптические эффекты (методы оптической анизотропии).

Вследствие различных направлений перемещений и скольжения металла по контактной поверхности светоотражательная способность становится неодинаковой (рисунок 2.4).

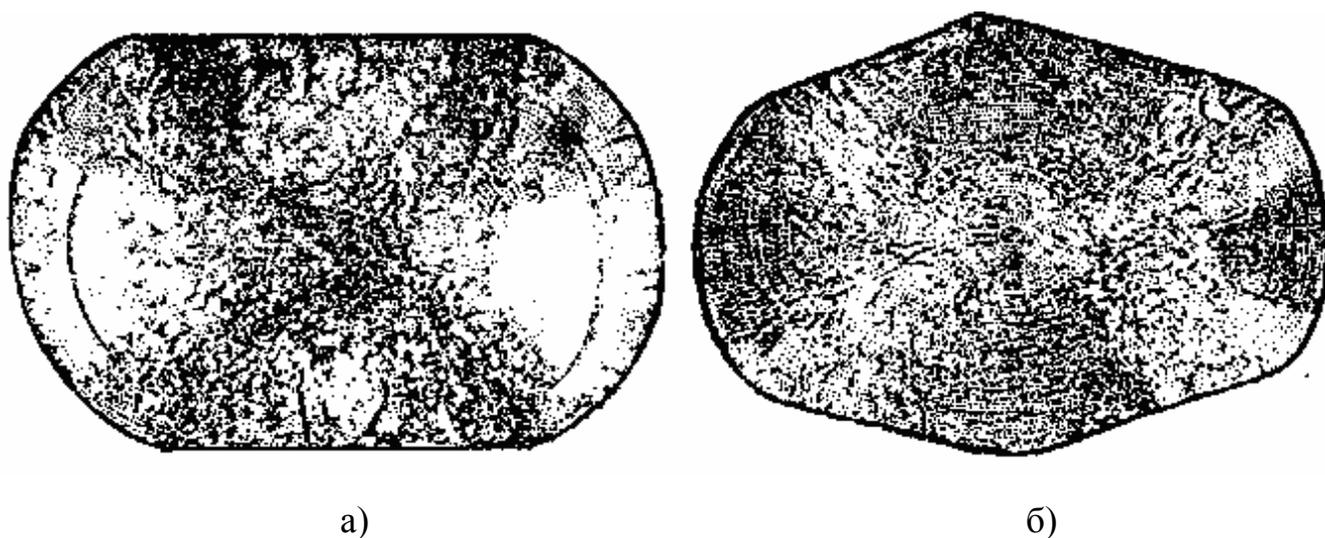


Рисунок 2.4 – Зоны деформации на торцах круглых заготовок, обжатых плоскими (а) и вырезными бойками (б)

В некоторых случаях поверхность образца покрывают лаком. При определенной степени деформации на пленке лака (или туши) появляются трещинки или она отстает от образца.

Рекристаллизация.

В случае неоднородно деформированного тела, при соответствующих температурно-скоростных условиях получается резко неоднородная структура. В одних местах тела структура будет рекристаллизованная, в других – частично рекристаллизованная, в третьих – без признаков рекристаллизации. Наиболее контрастные изображения зон деформации можно получить при собирательной рекристаллизации нагреве деформированной заготовки до температуры, близкой к температуре плавления [37] (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Зоны деформации в поперечном сечении цилиндрической осаженной заготовки после собирательной рекристаллизации

Поляризационно-оптический метод.

Картины изохром можно получить методом фотоупругости (в котором используется плоское напряженное состояние) и фотопластичности (с использованием плоского деформированного состояния), а также на образцах на образцах с вклейками из оптически активного материала [64], [65], в частности галлоидных солей серебра, ОНС – оптически неактивного в упругой области стекла, желатиноглицеринового студня и др. Картины достаточно контрастны и дают хорошее представление о границах очага деформации (рисунок 2.6).

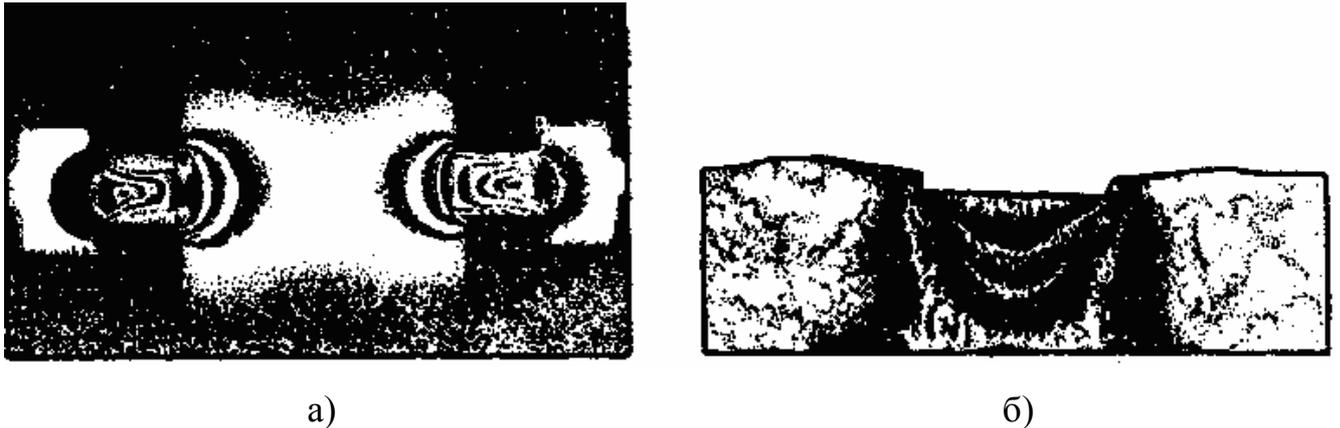


Рисунок 2.6 – Картины изохром, полученные на оптически активных клейках:  
а) – при штамповке; б) – при обжатии заготовки плоским бойком

### 2.2.3 Характеристика выбранных методов исследования

В работе предполагается изучить формоизменение заготовки, получить распределение местных деформаций в ее объеме, а также проследить перемещение материальных частиц заготовки.

Выбранные методы должны обеспечить приемлемую точность получаемых данных и их достоверность, относительно высокую быстроту обработки полученных данных. Материалы для проведения экспериментальных исследований должны быть доступными и иметь невысокую стоимость, а также не требовать сложного оборудования и оснастки для их обработки.

Нами выбраны два метода – метод слоистых заготовок и метод координатных сеток.

### 2.2.4 Применение метода слоистых заготовок

Метод слоистых заготовок является наиболее доступным. Он широко применяется в исследованиях [66], [67], [68], [33]. Результаты исследования, полученные при помощи метода слоистых заготовок, являются наглядными для интегрального описания деформированного состояния заготовки.

#### 2.2.4.1 Методика изготовления экспериментальных образцов

Для исследования формоизменения заготовок при осадке бойками с осевым отверстием применили заготовки, выполненные из пластилина. Заготовки представляют собой цилиндры, собранные из разноцветных дисков одинаковой толщины и диаметра (рисунок 2.7). Такая конструкция обеспечивает плотный контакт слоев между собой и предотвращает их отделение друг от друга в процессе деформирования, так как границы слоев расположены перпендикулярно действующей со стороны бойков силе.

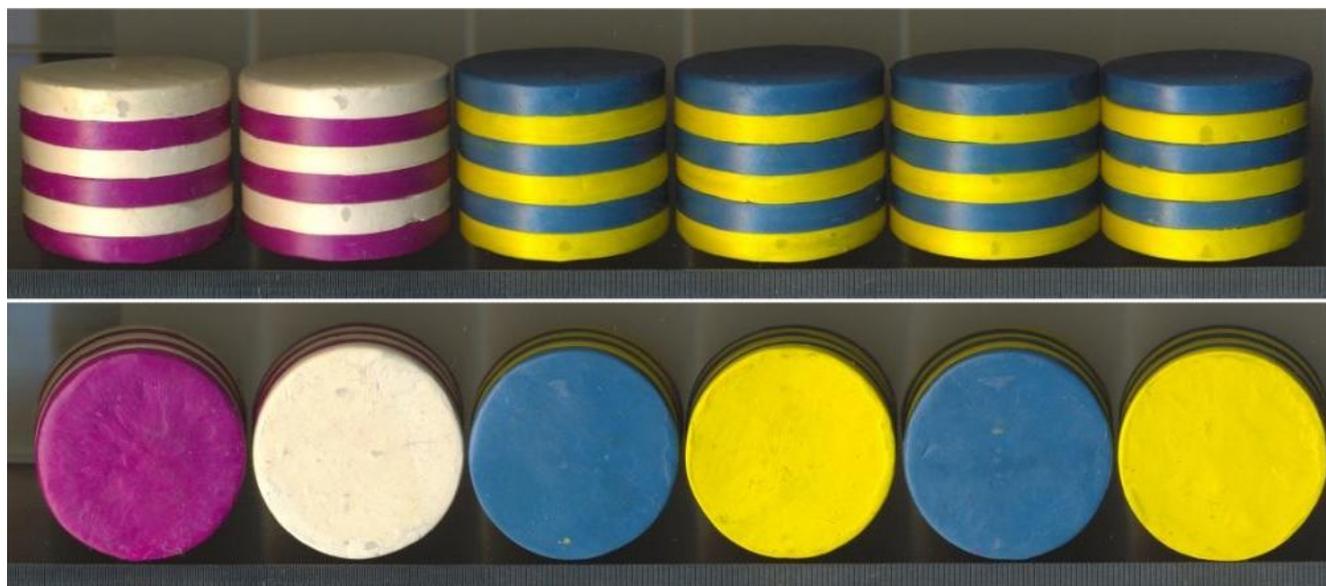


Рисунок 2.7 – Слоистые пластилиновые заготовки

Технология изготовления слоистой заготовки заключается в следующем: прокаткой пластилиновой заготовки изготовили полосы определенной толщины и цвета; из полосы вырубил калиброванным пуансоном круглые заготовки-диски; далее собрали заготовку, устанавливая диски друг на друга соосно, чередуя цвета.

Толщина слоев диска такая, что различима после деформирования; число слоев целое и четное, обеспечивает расположение границы между слоями в плоскости симметрии заготовки (в данном случае горизонтальной).

Отношение высоты заготовки к диаметру  $H_0/D_0$  выбрали равным 0,4, 0,8 и 1,2. Соотношение диаметра отверстия к диаметру заготовки  $D_{отв}/D_0$  выбрали 0,35, 0,55 и 0,72. Соответственно диаметр заготовки  $D_0$  составил 40 мм, высота  $H_0$  – 16, 32 и 48 мм, диаметр отверстия в инструменте  $D_{отв}$  14, 22 и 29 мм. Обоснование конкретных соотношений размеров дано перед каждым экспериментом.

#### 2.2.4.2 Разработка конструкции экспериментальной установки

К инструменту и оснастке предъявили следующие требования: оснастку можно установить на различные типы деформирующего оборудования (испытательные машины, прессы); она должна обеспечить соосное перемещение бойков, быструю установку и извлечение заготовок, непрерывное наблюдение за ходом процесса.

Бойки (рисунок 2.8 и рисунок 2.9) изготовили из штамповой стали 5ХНВ, а контейнер – прозрачным, из оргстекла (рисунок 2.10). В стенке контейнера выполнены отверстия, предназначенные для размещения измерительного инструмента, устройства для центрирования заготовки и ограничителей перемещения бойков по высоте. Для предотвращения движения бойков под действием собственного веса, а также для придания конструкции дополнительной жесткости применили стяжные хомуты (см. рисунок 2.10).

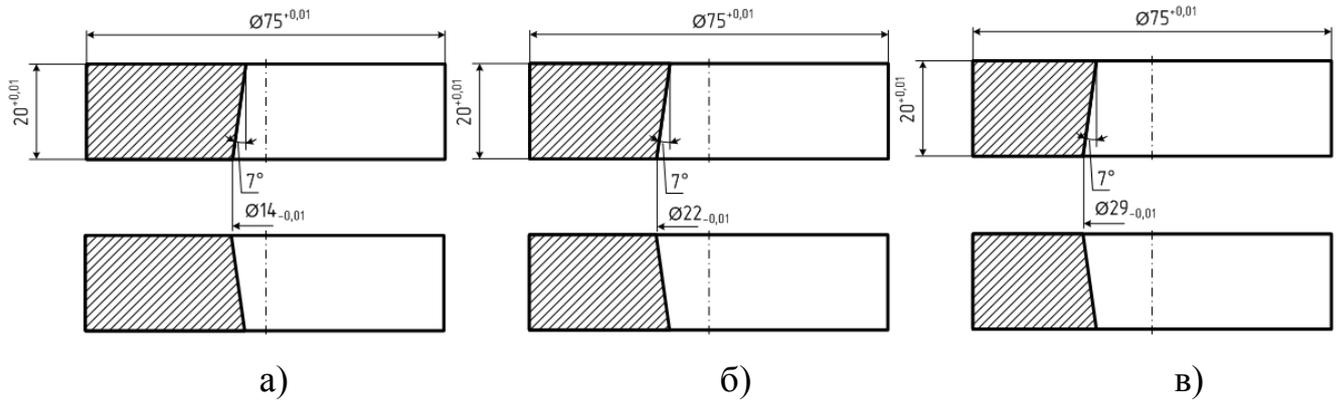


Рисунок 2.8 – Эскиз бойков с осевым отверстием 14 (а), 22 (б) и 29 мм (в)

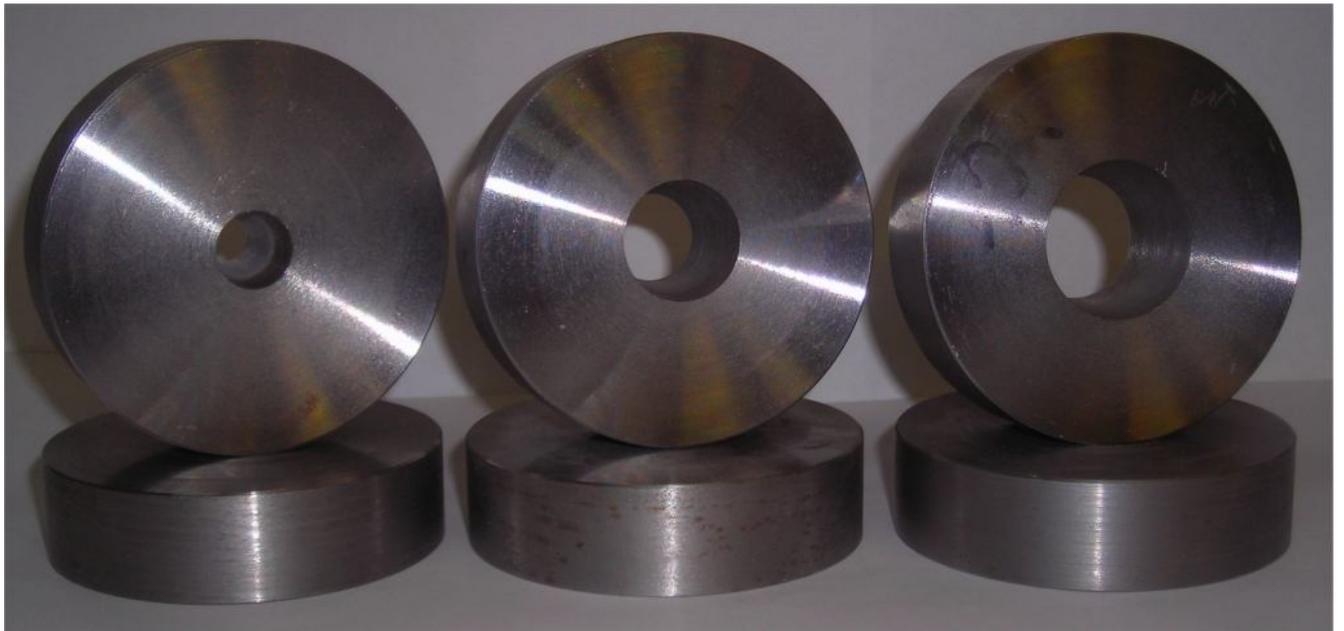


Рисунок 2.9 – Бойки с осевым отверстием

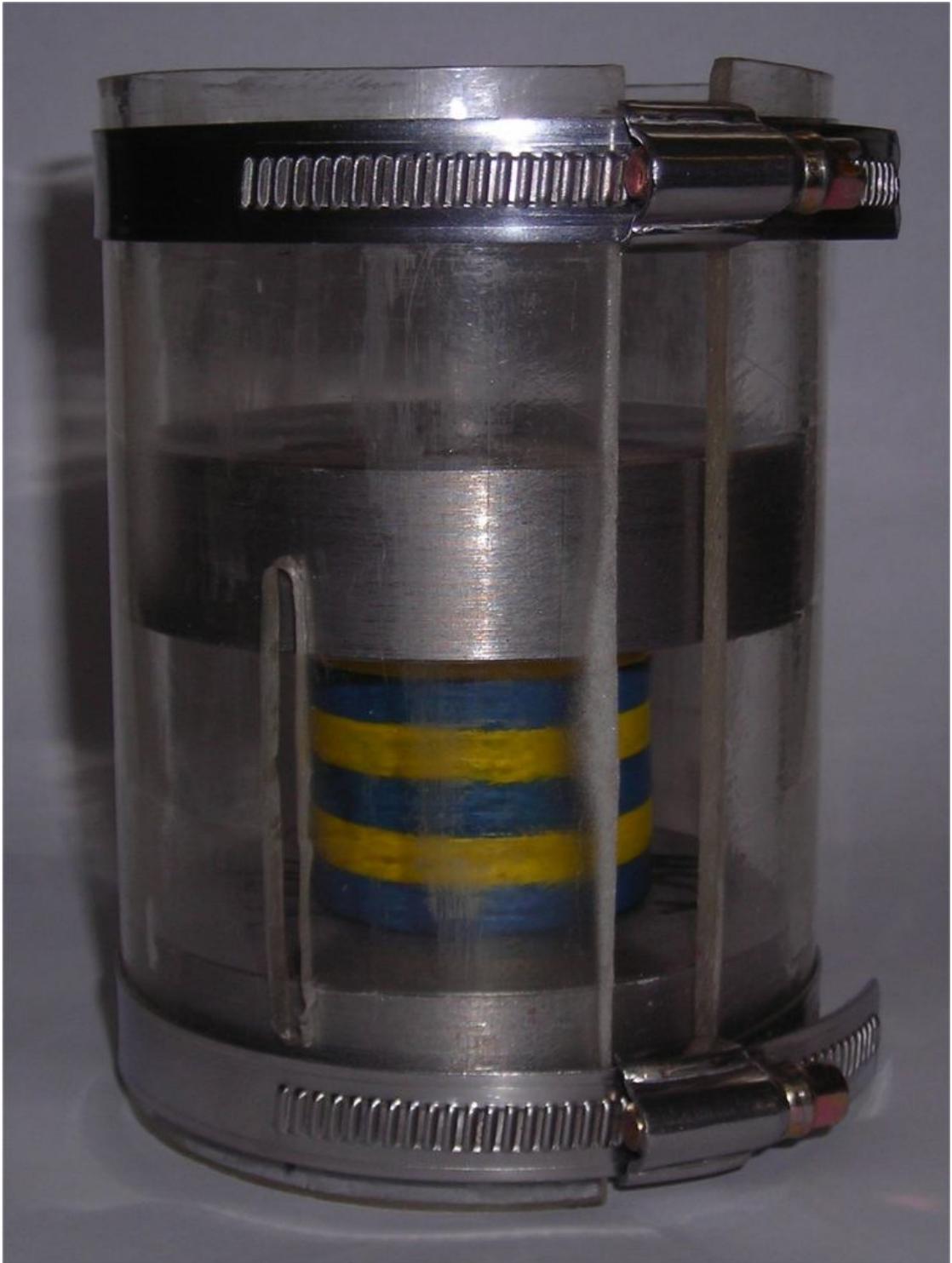


Рисунок 2.10 – Направляющий контейнер с установленными бойками и заготовкой

### 2.2.4.3 Этапы и результаты обработки экспериментальных данных, полученных на слоистых заготовках

Заготовки деформировали с единичными обжатиями  $\varepsilon_{\text{он}} = 13, 30, 50, 60$  и  $70\%$ . На каждой стадии измеряли размеры заготовки и фотографировали форму боковой поверхности (рисунок 2.11).

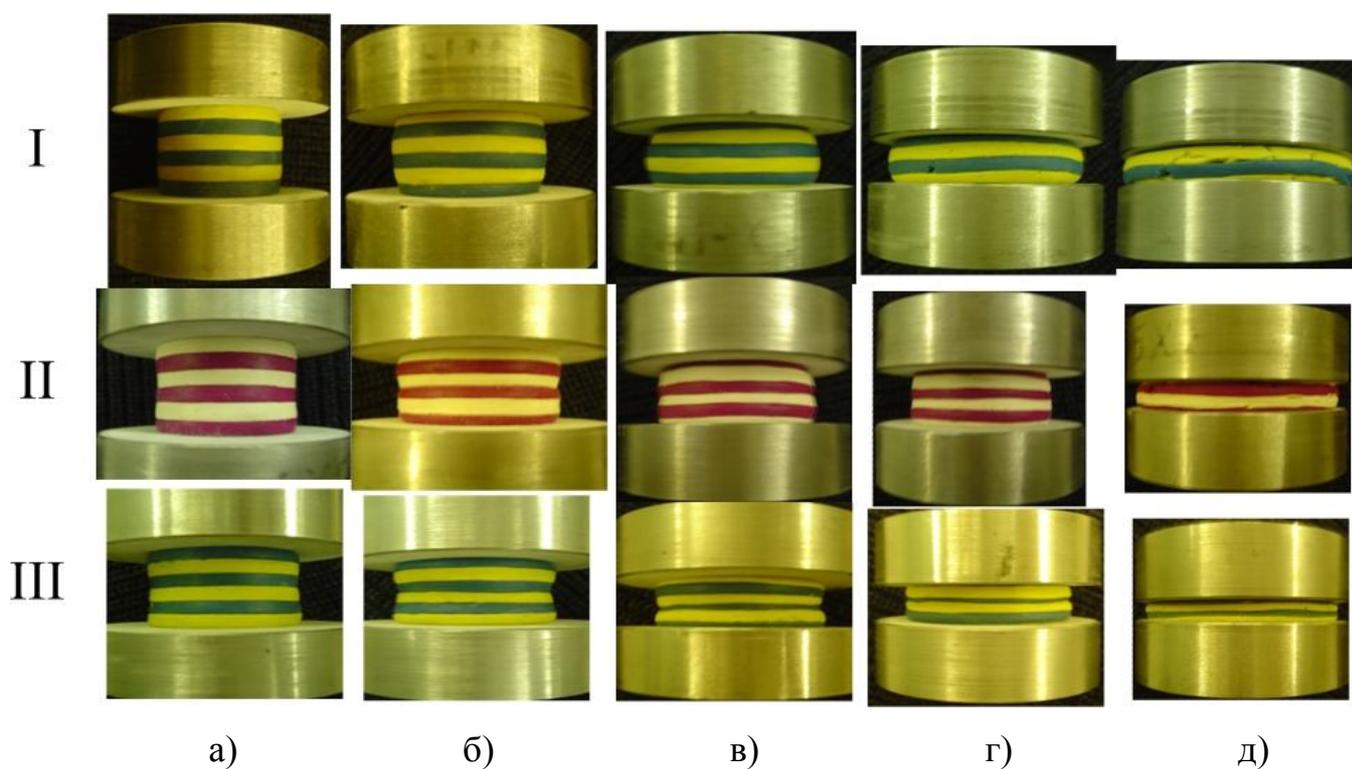


Рисунок 2.11 – Форма боковой поверхности заготовок, обжатых на 13 (а), 30 (б), 50 (в), 60 (г) и 70 % (д);  $D_{\text{отв}}/D_0 - 0,35$  (I),  $0,55$  (II),  $0,72$  (III)

Степени единичного обжатия выбрали такими, чтобы изучить весь диапазон когда-либо примененный в предыдущих исследованиях и полезный для применения бойков с осевым отверстием в условиях современной кузнечной индустрии России.

Заготовки обжимали, а затем разрезали по меридиональной плоскости и фотографировали (рисунок 2.12).

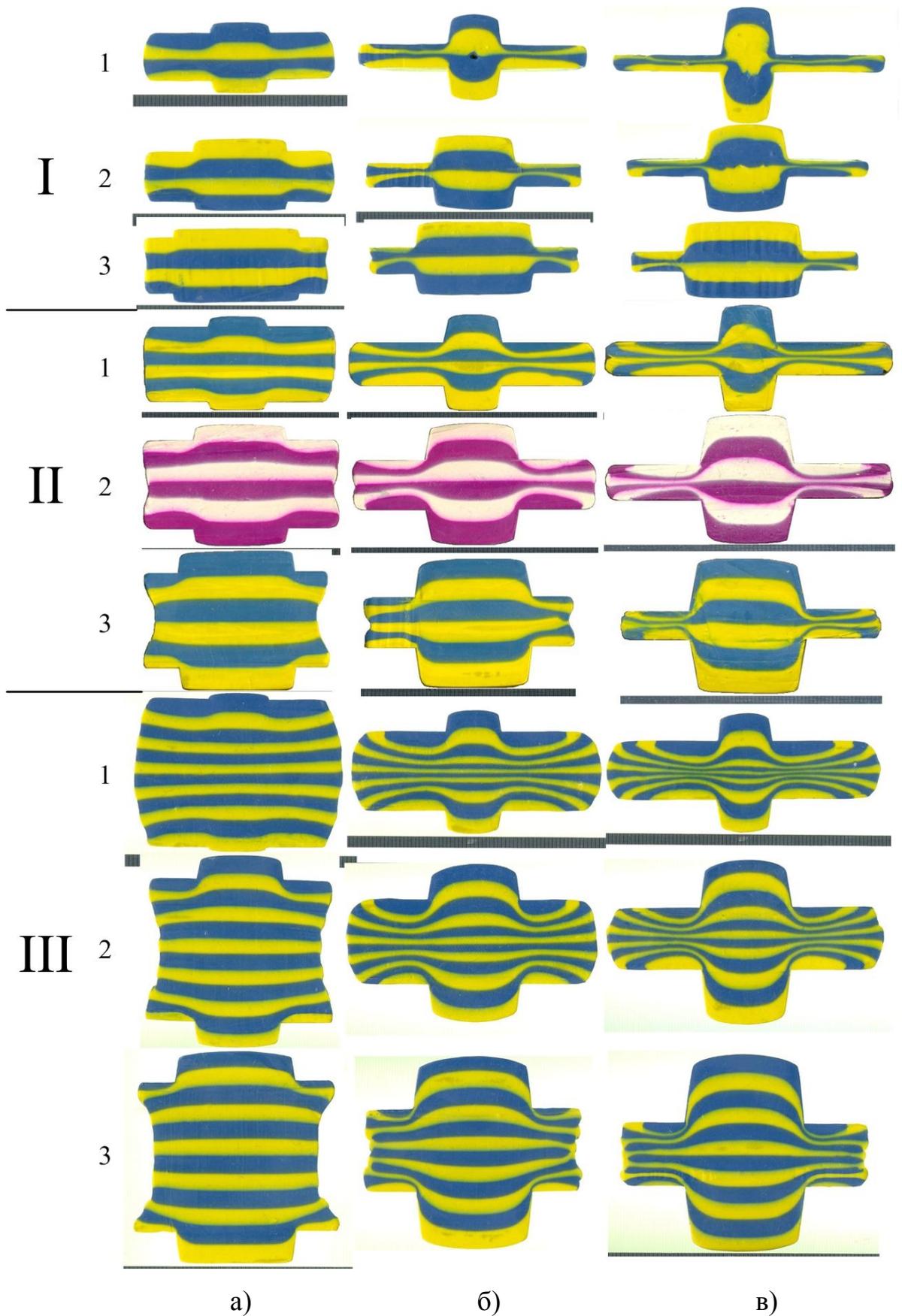


Рисунок 2.12 – Меридиональные сечения слоистых заготовок, обжатых на 30 (а), 60 (б) и 70 % (в); I –  $H_0/D_0 = 0,4$ , II –  $H_0/D_0 = 0,8$ , II –  $H_0/D_0 = 1,2$ ;  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (1), 0,55 (2), 0,72 (3)

Местные деформации рассчитывали по следующей методике: на фотографиях нумеровали слои (от 1 до 6), проводили нормали к границам слоев, присваивая каждой нормали свой номер (рисунок 2.13); по середине нормалей размечали точки; измеряли расстояние между слоями по нормальям (толщины) и рассчитывали местные деформации по формулам  $e_1 = \ln \frac{h_{0i}}{h_{ij}}$  и  $\varepsilon_{01} = \frac{h_{0i} - h_{ij}}{h_{0i}}$ , получив компоненту деформации вдоль кратчайшего расстояния между слоями, т.е. компоненту 1 главных деформаций. Распределение местных главных логарифмических деформаций показано на рисунке 2.14.

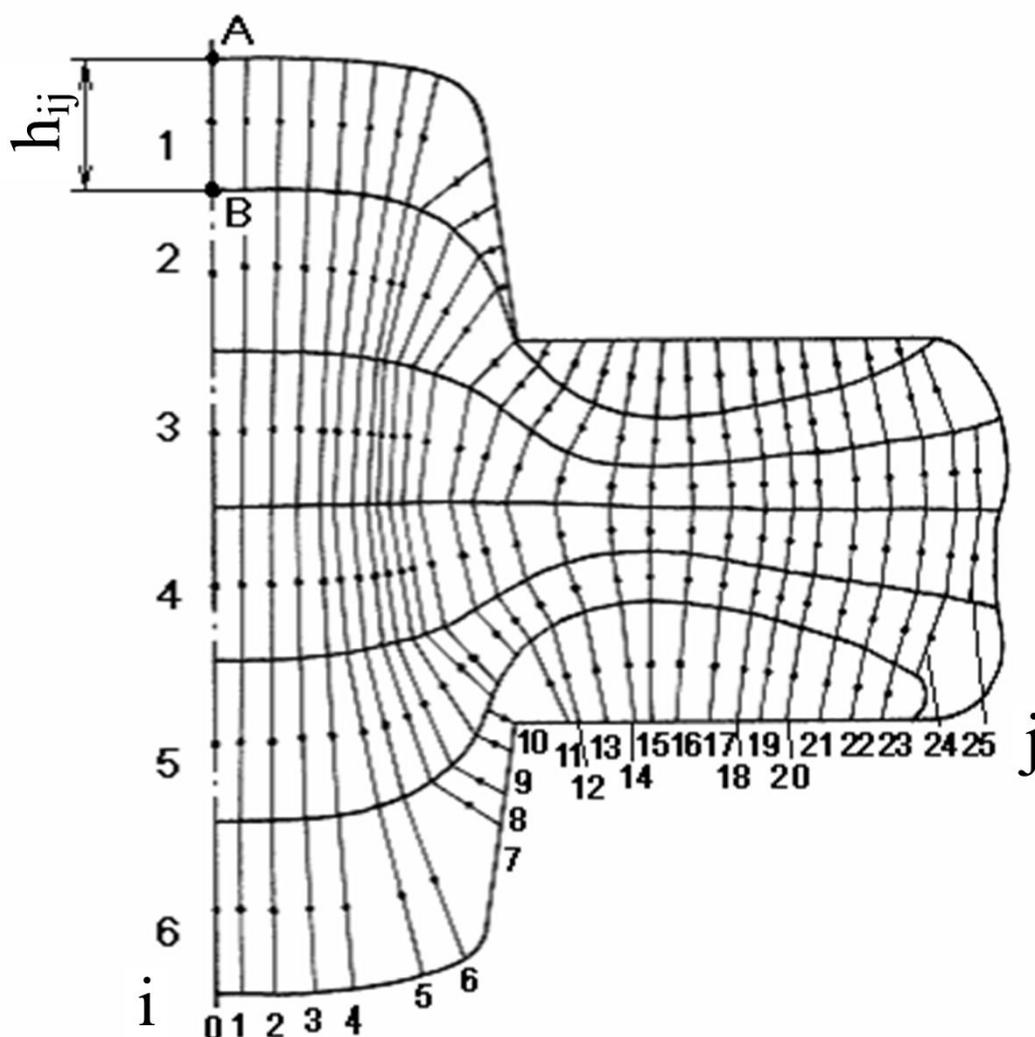


Рисунок 2.13 – Разметка слоев в сечении обжатой заготовки



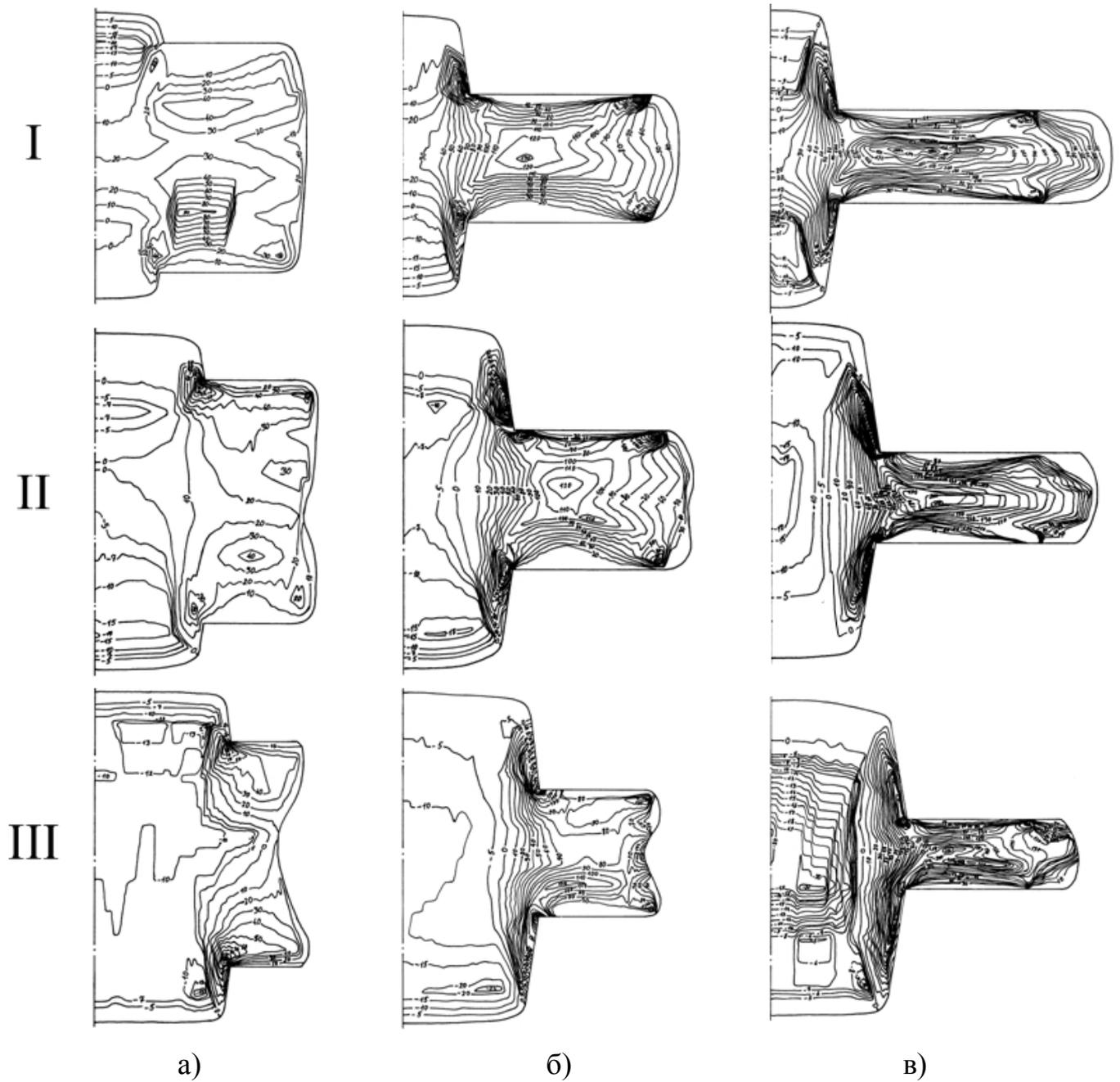


Рисунок 2.15 – Поля местных главных логарифмических деформаций  $\epsilon_1$  в меридиональных сечениях обжатых заготовок.  $H_0/D_0 = 0,8$ ;  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (I),  $0,55$  (II),  $0,72$  (III);  $\epsilon_{он} = 0,30$  (а),  $0,60$  (б),  $0,70$  (в)

Для простоты восприятия поля истинных логарифмических деформаций дополнены полями относительных деформаций (рисунок 2.16).

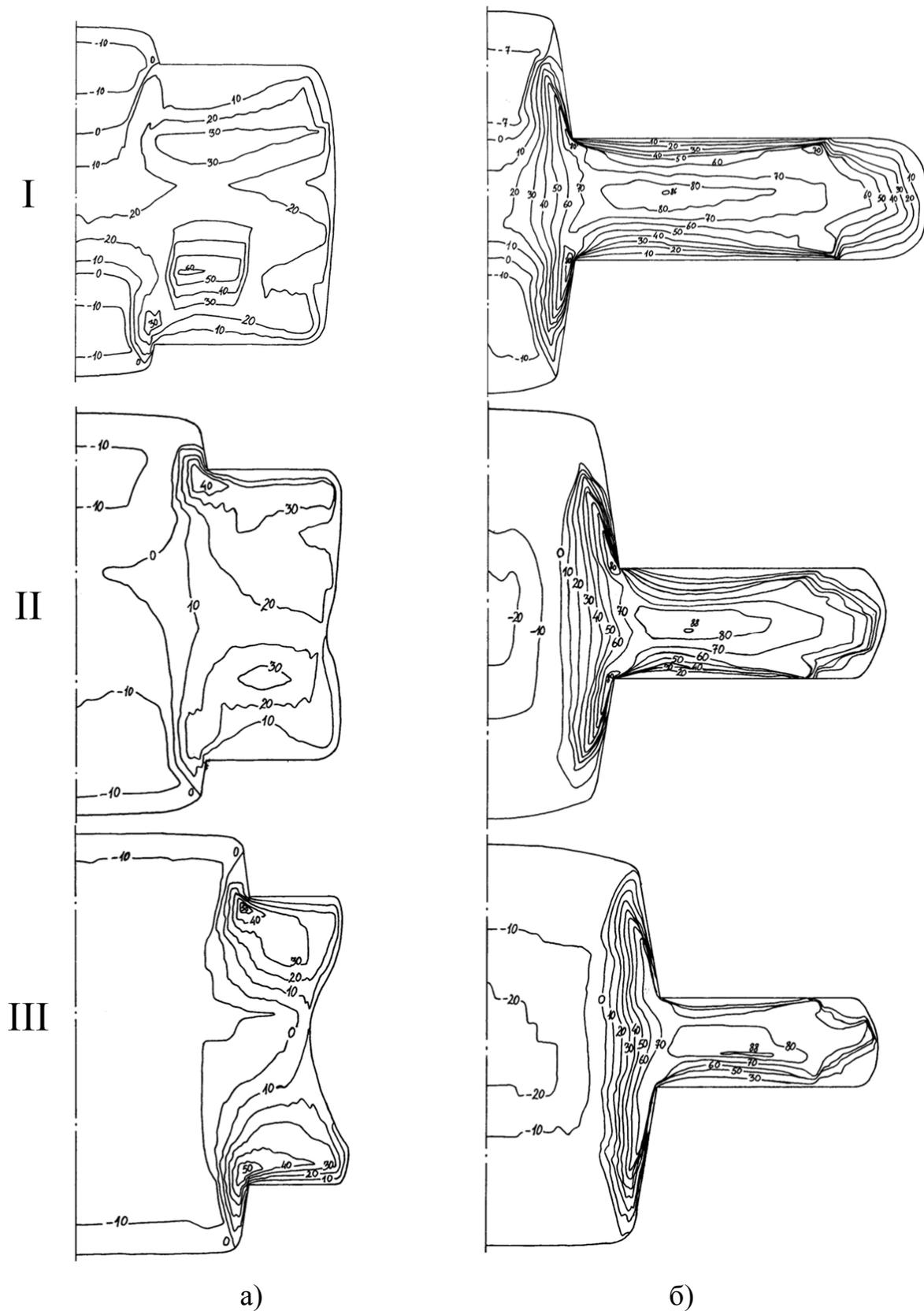


Рисунок 2.16 – Поля местных главных относительных деформаций  $\varepsilon_{01}$  в меридиональных сечениях обжатых заготовок.  $H_0/D_0 = 0,8$ ;  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (I),  $0,55$  (II),  $0,72$  (III);  $\varepsilon_{0H} = 0,30$  (а) и  $\varepsilon_{0H} = 0,70$  (б)

При рассмотрении полей деформаций можно отметить следующее:

- для заготовки, обжатой бойками с соотношением  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,35$ .

На начальной стадии обжатия ( $\epsilon_{\text{он}} = 0,13$ ) нет выраженного характера неравномерного распределения деформаций, отсутствуют области с локализацией деформаций. Недеформированные области расположены в полотно диска вблизи контактной поверхности под плоскими частями бойков. Области с малыми значениями деформации расположены в цапфах (где деформации отрицательные с максимальным значением минус 0,1) и под ними. В остальной части заготовки деформации положительные с максимальным значением 0,6. Линии смены знака деформации – нейтральные – расположены под отверстиями бойков и распространяются в заготовку на расстояние, примерно равное высоте цапфы в рассмотренных заготовках.

На стадии обжатия при  $\epsilon_{\text{он}} = 0,6$  области локализации деформации расположены вблизи перехода плоской части бойка в отверстие, вблизи перехода свободной боковой поверхности на контактную, а также в полотно диска на середине его высоты. Области с малыми значениями деформации расположены в цапфах, под отверстиями бойков, вблизи свободной боковой поверхности заготовки и вблизи контактной поверхности под плоскими частями бойков. В цапфах деформации отрицательные (максимальное значение минус 0,1), в остальной части заготовки положительные (максимальное значение 1,3). Нейтральные линии расположены в цапфах рассмотренных заготовок.

На завершающей стадии обжатия ( $\epsilon_{\text{он}} = 0,7$ ) области локализации деформации расположены вблизи перехода плоской части бойка в отверстие и вблизи перехода свободной боковой поверхности на контактную. Полотно диска практически полностью продеформировано. Области с малыми значениями деформации расположены в цапфах, под отверстиями бойков, вблизи свободной боковой поверхности заготовки и вблизи контактной поверхности под плоскими частями бойков. В цапфах деформации отрицательные (максимальное значение

минус 0,1), в остальной части заготовки положительные (максимальное значение 2,0). Нейтральные линии расположены в цапфах.

- для заготовки, обжатой бойками с соотношением  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,55$

На начальной стадии обжатия ( $\epsilon_{\text{он}} = 0,13$ ) нет выраженного характера неравномерного распределения деформаций. Имеются небольшие области с локализацией деформаций, расположенные вблизи перехода плоской части бойка в отверстие. Недеформированные области расположены в полотно диска вблизи контактной поверхности под плоскими частями бойков. Области с малыми значениями деформации расположены в цапфах и под отверстиями бойков. В цапфах и под ними деформации отрицательные (максимальное значение минус 0,1), в остальной части заготовки положительные (максимальное значение 0,3). Вогнутая к оси нейтральная линия расположена под отверстиями бойков и проходит через всю заготовку.

На стадии обжатия при  $\epsilon_{\text{он}} = 0,6$  области локализации деформации расположены вблизи перехода плоской части бойка в отверстие, вблизи перехода свободной боковой поверхности на контактную, а также в полотно диска на середине его высоты. Области с малыми значениями деформации расположены в цапфах, под отверстиями бойков, вблизи свободной боковой поверхности заготовки и вблизи контактной поверхности под плоскими частями бойков. В цапфах и под ними деформации отрицательные (максимальное значение минус 0,15), в остальной части заготовки положительные (максимальное значение 1,2). Нейтральная проходит от верхней до нижней цапфы и вогнута к оси заготовки.

На завершающей стадии обжатия ( $\epsilon_{\text{он}} = 0,7$ ) области локализации деформации расположены вблизи перехода плоской части бойка в отверстие, вблизи перехода свободной боковой поверхности на контактную. Полотно диска практически полностью продеформировано. Области с малыми значениями деформации расположены в цапфах, под отверстиями бойков и вблизи свободной боковой поверхности заготовки. В цапфах и под ними деформации отрицательные (максимальное значение минус 0,17), в остальной части заготовки положительные

(максимальное значение 2,1). Нейтральная проходит от верхней до нижней цапфы и вогнута к оси заготовки.

- для заготовки, обжатой бойками с соотношением  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,72$

На начальной стадии обжатия ( $\epsilon_{\text{он}} = 0,13$ ) нет выраженного характера неравномерного распределения деформаций. Имеются небольшие области с локализацией деформаций, расположенные вблизи перехода плоской части бойка в отверстие. Недеформированные области расположены в полотно диска вблизи контактной поверхности под плоскими частями бойков. Области с малыми значениями деформации расположены в цапфах и под отверстиями бойков. В цапфах и под ними деформации отрицательные (максимальное значение минус 0,1), в остальной части заготовки положительные (максимальное значение 0,4). Выпуклая от оси нейтральная линия проходит от верхней до нижней цапфы и проходит через полотно диска.

На стадии обжатия при  $\epsilon_{\text{он}} = 0,6$  области локализации деформации расположены вблизи перехода плоской части бойка в отверстие и вблизи перехода свободной боковой поверхности на контактную. Области с малыми значениями деформации расположены в цапфах, под отверстиями бойков и вблизи контактной поверхности под плоскими частями бойков. В цапфах и под ними деформации отрицательные (максимальное значение минус 0,15), в остальной части заготовки положительные (максимальное значение 0,8). Нейтральная линия проходит от верхней до нижней цапфы и вогнута к оси заготовки.

На завершающей стадии обжатия ( $\epsilon_{\text{он}} = 0,7$ ) области локализации деформации расположены вблизи перехода плоской части бойка в отверстие, вблизи перехода свободной боковой поверхности на контактную. Полотно диска практически полностью продеформировано. Области с малыми значениями деформации расположены в цапфах, под отверстиями бойков и вблизи контактной поверхности под плоскими частями бойков. В цапфах и под ними деформации отрицательные (максимальное значение минус 0,2), в остальной

части заготовки положительные (максимальное значение 2,1). Нейтральная линия проходит от верхней до нижней цапфы и вогнута к оси заготовки.

Для всех рассмотренных соотношений размеров в системе «инструмент-заготовка» области с небольшими значениями местных деформаций расположены в цапфах, под отверстиями и вблизи контактной поверхности под плоскими частями бойков.

Нейтральные линии при соотношении  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,35$  располагаются в цапфах; при увеличении соотношения  $D_{\text{отв}}/D_0$  две линии соединяются и полученная одна линия проходит через всю заготовку. Однако, на начальных стадиях обжатия эта линия при соотношении  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,55$  располагается под отверстиями бойков и вогнута к оси заготовки, а при соотношении  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,72$  эта линия выпуклая от оси и проходит через полотно диска.

При увеличении степени обжатия для соотношения  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,35$  расположение нейтральной линии не меняется.

Для соотношения  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,55$  при увеличении степени обжатия кривизна нейтральной линии уменьшается.

Для соотношения  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,72$  при увеличении степени обжатия кривизна нейтральной линии меняется на противоположную.

Поля местных главных относительных деформаций и поля главных логарифмических деформаций схожи по характеру.

### 2.2.5 Применение метода координатных сеток

Для решения поставленных в работе задач применены координатные сетки в виде системы параллельных взаимноперпендикулярных линий.

Размер ячейки выбирали таким, чтобы после деформации ее стороны можно было считать прямыми. Тогда деформированное состояние внутри ячейки можно

считать близким к однородному. Методика обработки деформированных координатных сеток наиболее подробно изложена в работе [66].

#### 2.2.5.1 Методика изготовления экспериментальных образцов

Металлические заготовки изготовили из технического чистого свинца, деформирование которого при комнатной температуре реологически приближено к горячему деформированию стали.

Заготовки получили из слитков (рисунок 2.17) одной плавки, которые прессовали для получения прутков, а затем термообрабатывали.



Рисунок 2.17 – Слитки из свинца

Прутки разрезали на мерные заготовки с припуском на механическую обработку торцов. Соотношения геометрических размеров образцов задали такими же, как и в экспериментах со слоистыми заготовками  $H_0/D_0 = 0,8$  и  $1,2$ .

Образцы для деформирования изготовили из двух полуцилиндров, на плоскости которых нанесли координатные сетки (рисунок 2.18). Шаг сетки выбрали минимально возможным, но значительно превышающим размеры зерен свинца, с тем, чтобы линии сетки были различимы после деформирования. Сетки нанесли резцом на фрезерном станке с точностью до  $0,05$  мм.



Рисунок 2.18 – Полуцилиндры с координатной сеткой

Фотографии координатных сеток экспериментальных образцов даны на рисунке 2.19.

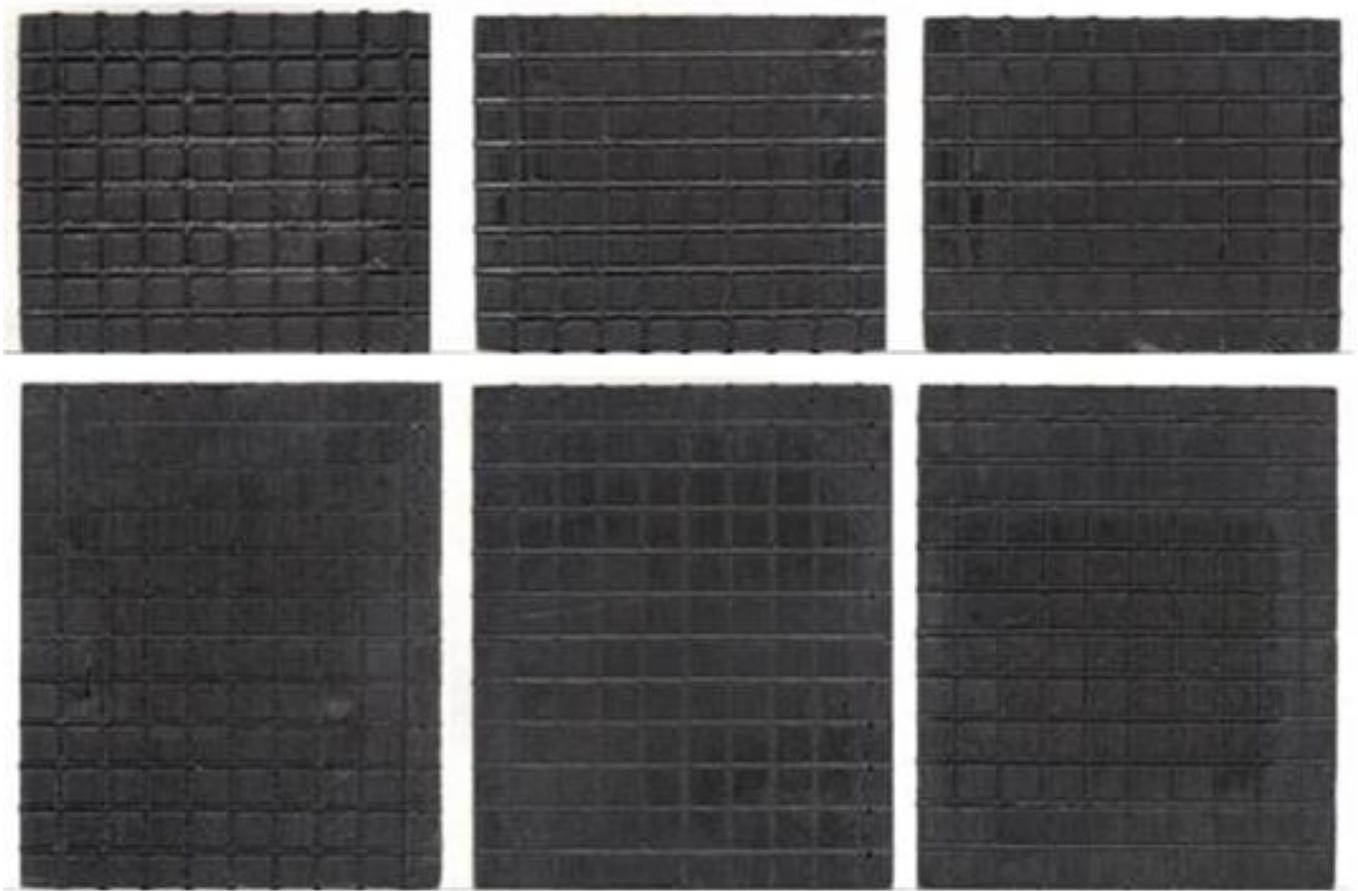


Рисунок 2.19 – Фотографии координатных сеток в заготовках с соотношением размеров  $H_0/D_0 = 0,8$  – верхний ряд и  $1,2$  – нижний ряд

Перед осадкой полуцилиндры скрепляли сплавом Вуда.

#### 2.2.5.2 Этапы и результаты обработки данных, полученных на заготовках с координатными сетками

Образцы обжимали постадийно, так же как и слоистые заготовки. Значения фактических обжатий приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Степени обжатия  $\epsilon_{\text{он}}$  (в процентах) свинцовых заготовок

$H_0/D_0$	$D_{\text{отв}}/D_0$		
	0,35	0,55	0,72
0,8	18,3	20,3	18,9
	31,8	30,7	32,1
	48,2	44,8	45,2
	62,1	58,1	61,0
1,2	15,7	16,5	17,1
	27,5	23,5	29,2
	43,9	52,4	43,1
	59,8	57,9	59,2
	71,5	70,8	71,0

На каждой стадии деформирования измеряли геометрические размеры заготовок и фотографировали плоскости разъема заготовок: координатные сетки (рисунок 2.20) и зеренную структуру (рисунок 2.21).

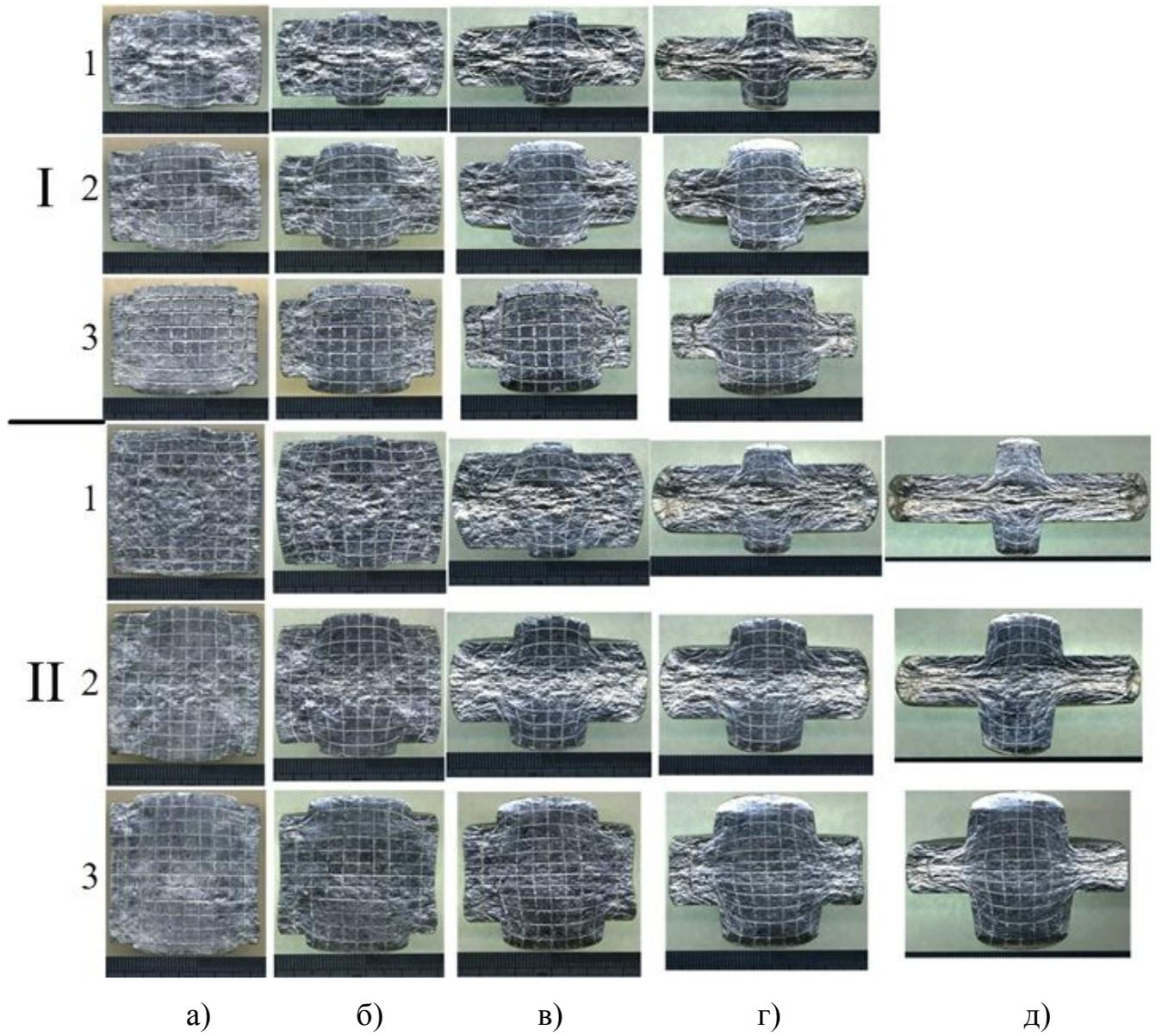


Рисунок 2.20 – Фотографии координатных сеток. а-д – ступени обжатия;  
 $H_0/D_0 = 0,8 - I, 1,2 - II$ ;  $D_{отв}/D_0 = 0,35 - 1, 0,55 - 2, 0,72 - 3$

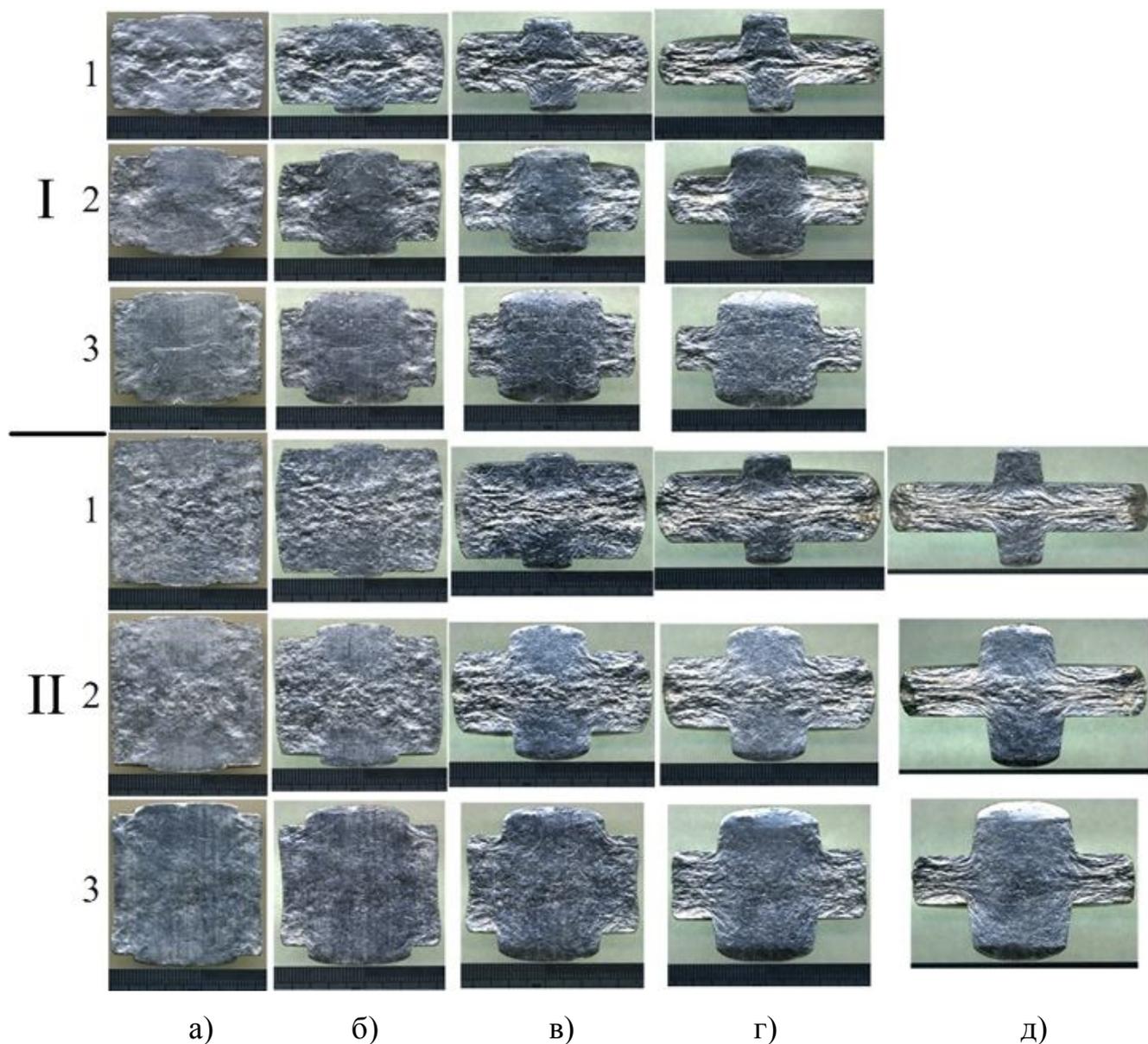


Рисунок 2.21 – Фотографии зеренной структуры. а-д – ступени обжатия;  
 $H_0/D_0 = 0,8$  – I,  $1,2$  – II;  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  – 1,  $0,55$  – 2,  $0,72$  – 3

По полученным фотографиям рассчитали местные деформации, построили траектории перемещения узлов координатной сетки, а также оценили конфигурацию и границы очага деформации.

Местные деформации в окрестности, ограниченной ячейкой координатной сетки, рассчитывали для двух кратчайших направлений – между горизонтальными линиями сетки ( $\epsilon_1$  и  $\epsilon_{01}$ ) и вертикальными ( $\epsilon_2$  и  $\epsilon_{02}$ ).

Далее построили поля местных деформаций, представленные на рисунке 2.22, рисунке 2.23, рисунке 2.24 и рисунке 2.25.

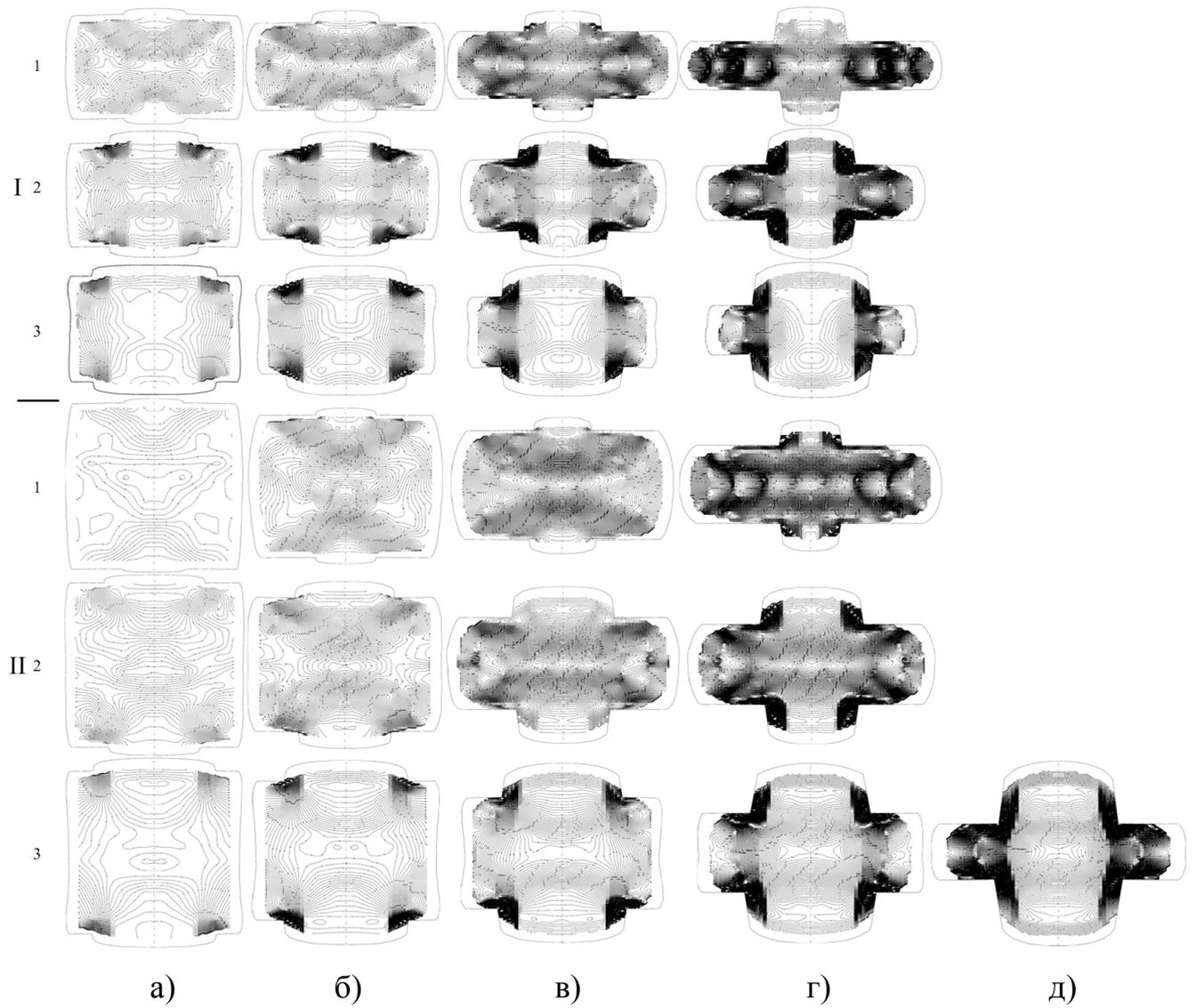


Рисунок 2.22 – Поля местных логарифмических деформаций  $\epsilon_1$ .  
 а-д – степени обжатия;  $H_0/D_0 = 0,8$  – I,  $1,2$  – II;  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  – 1,  $0,55$  – 2,  $0,72$  – 3

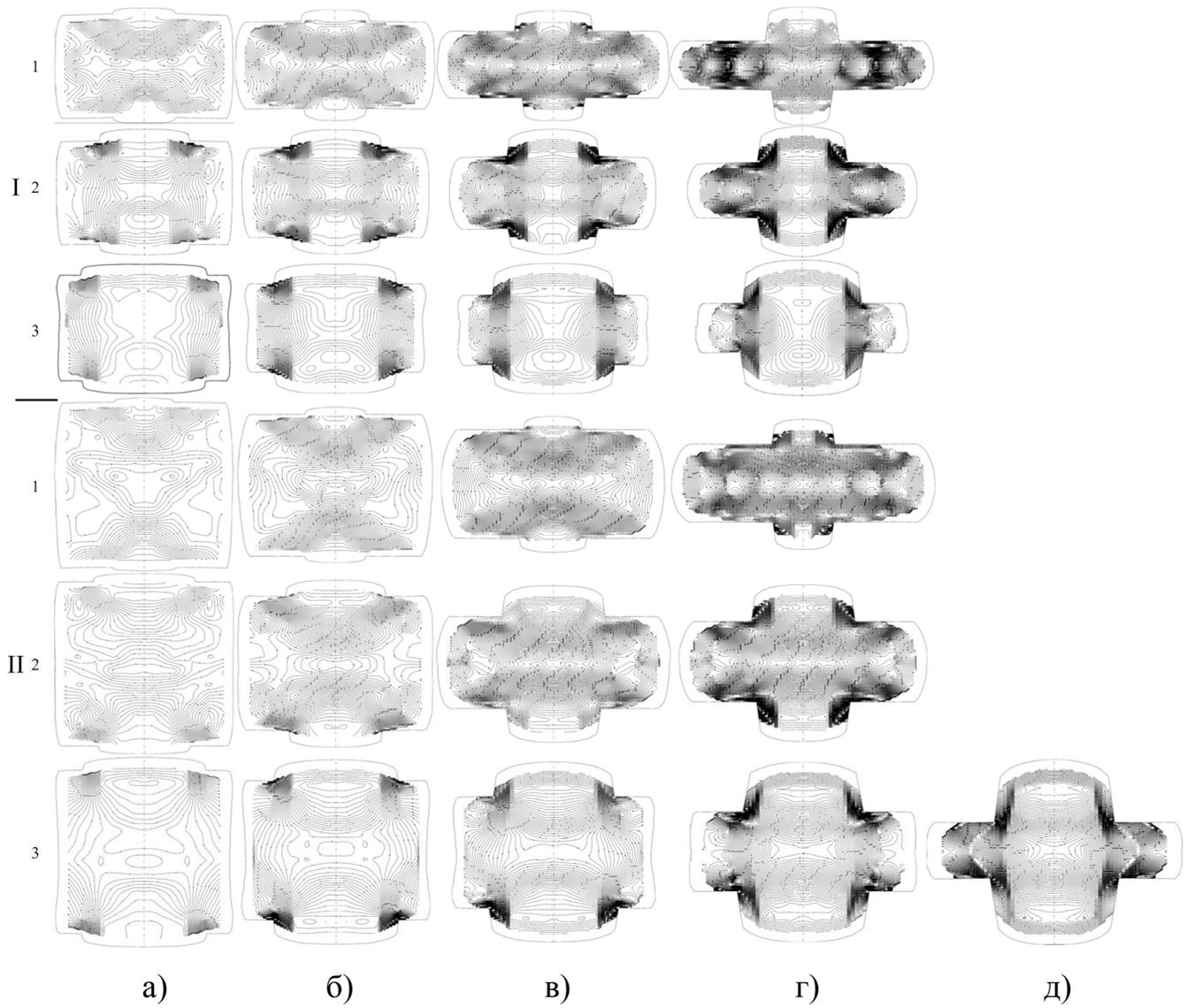


Рисунок 2.23 – Поля местных относительных деформаций  $\varepsilon_{01}$ .

а-д – степени обжатия;  $H_0/D_0 = 0,8 - I, 1,2 - II$ ;  $D_{отв}/D_0 = 0,35 - 1, 0,55 - 2, 0,72 - 3$

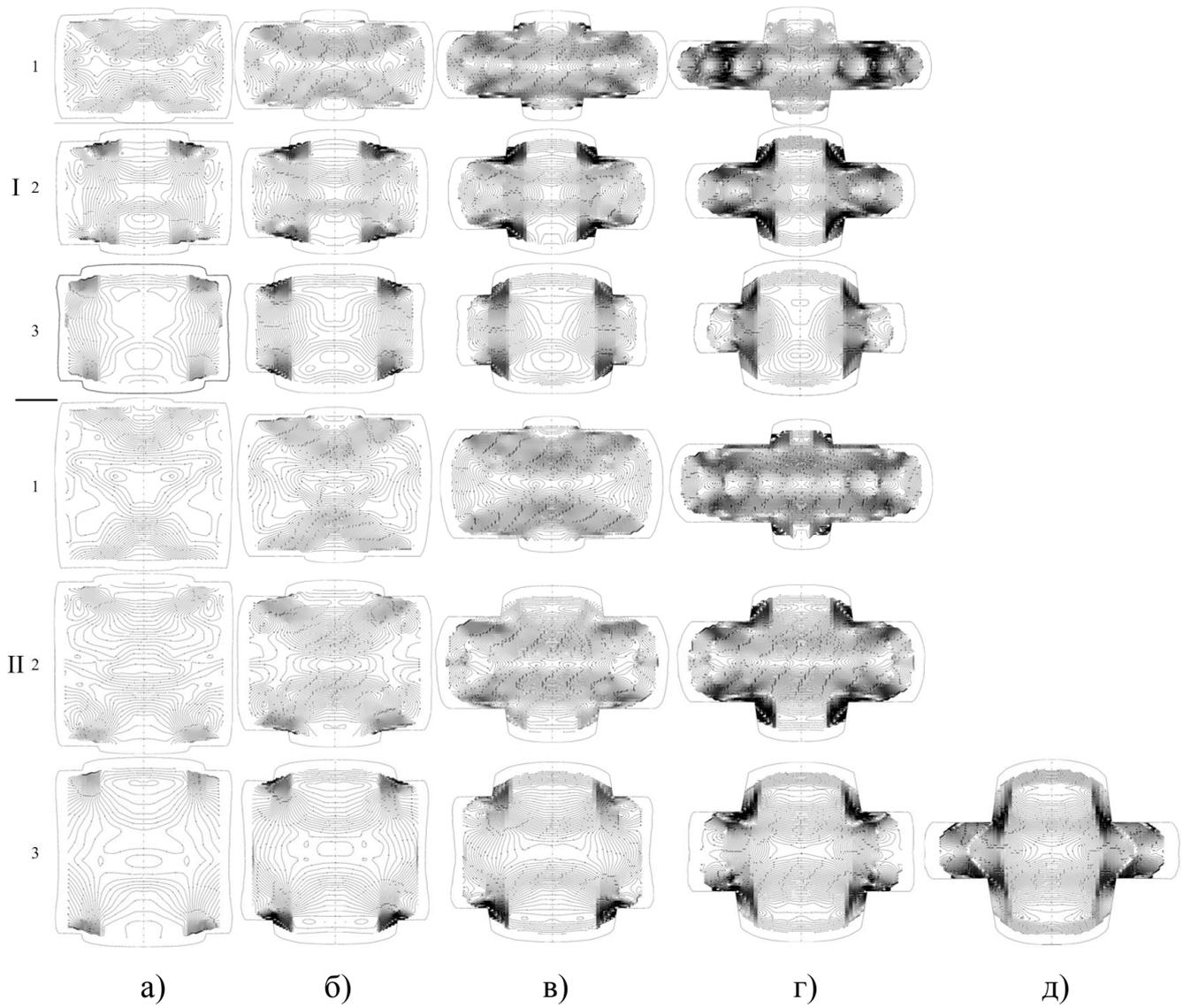


Рисунок 2.24 – Поля местных логарифмических деформаций  $e_2$ .

а-д – ступени обжатия;  $H_0/D_0 = 0,8 - I, 1,2 - II$ ;  $D_{отв}/D_0 = 0,35 - 1, 0,55 - 2, 0,72 - 3$

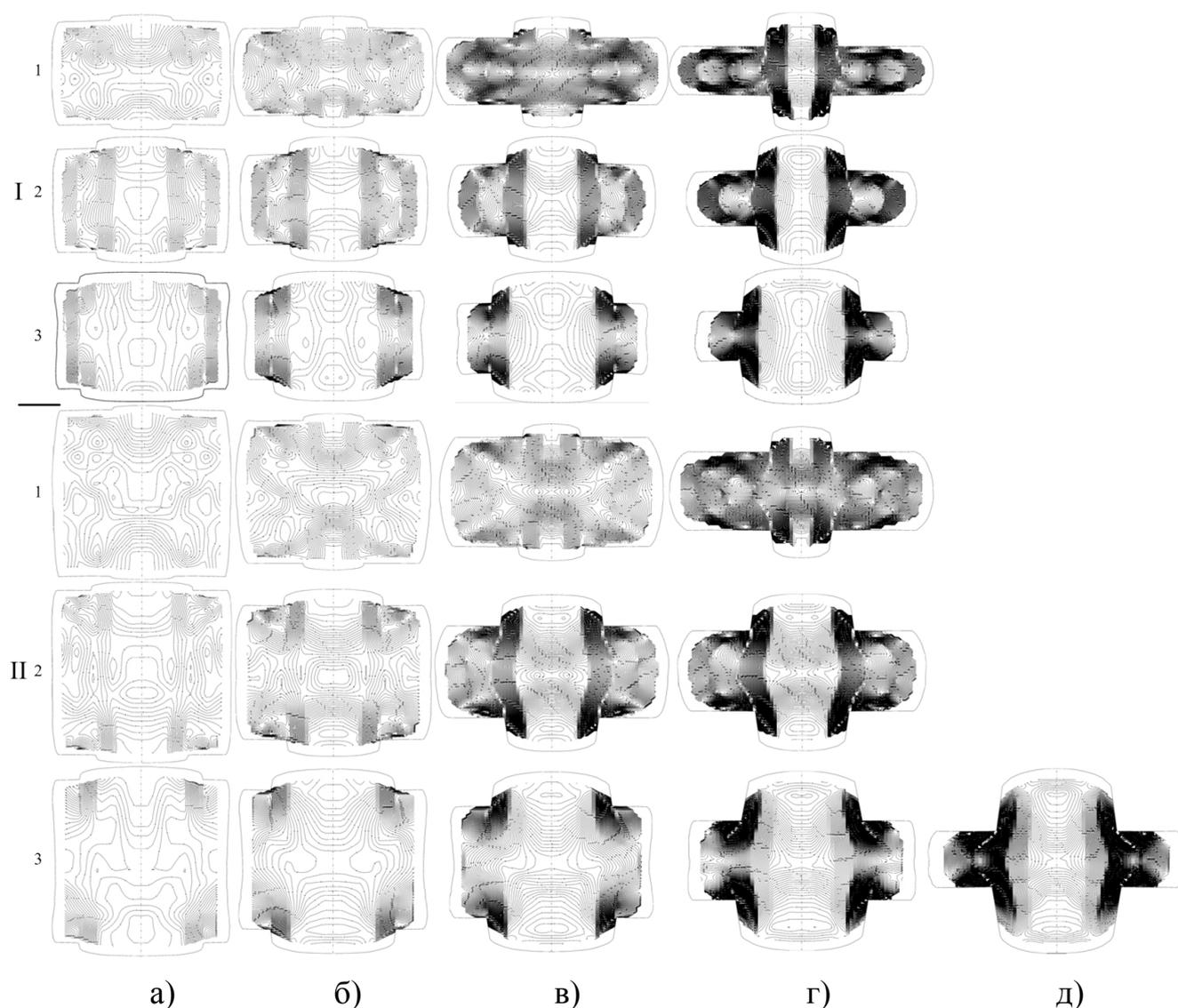


Рисунок 2.25 – Поля местных относительных деформаций  $\varepsilon_{02}$ .

а-д – степени обжатия;  $H_0/D_0 = 0,8 - I, 1,2 - II$ ;  $D_{отв}/D_0 = 0,35 - 1, 0,55 - 2, 0,72 - 3$

Поля компонент деформаций  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_{01}$  хорошо коррелируются с полями, построенными по результатам обработки фотографий деформированных слоистых заготовок. В частности, нет выраженного характера неравномерного распределения деформаций на начальных стадиях обжатия, области локализации деформации располагаются вблизи перехода плоской части бойка в отверстие, области с малыми значениями деформации расположены в цапфах, под отверстиями бойков, и на начальных стадиях обжатия вблизи свободной боковой поверхности заготовки и вблизи контактной поверхности с бойками.

Поля деформаций, построенные для компонент деформации  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_{01}$  и  $\epsilon_{02}$  схожи по характеру.

На полях можно отметить рассредоточение линий уровня, которые являются границами куполообразных зон под верхним и нижним бойками (рисунки 2.22-2.25, I, 1, а, б, в, II, 1, в).

Траектории перемещения узлов координатной сетки.

Траектории (рисунок 2.26) построены по координатам узлов сетки при постадийном обжатии (см. таблицу 1).

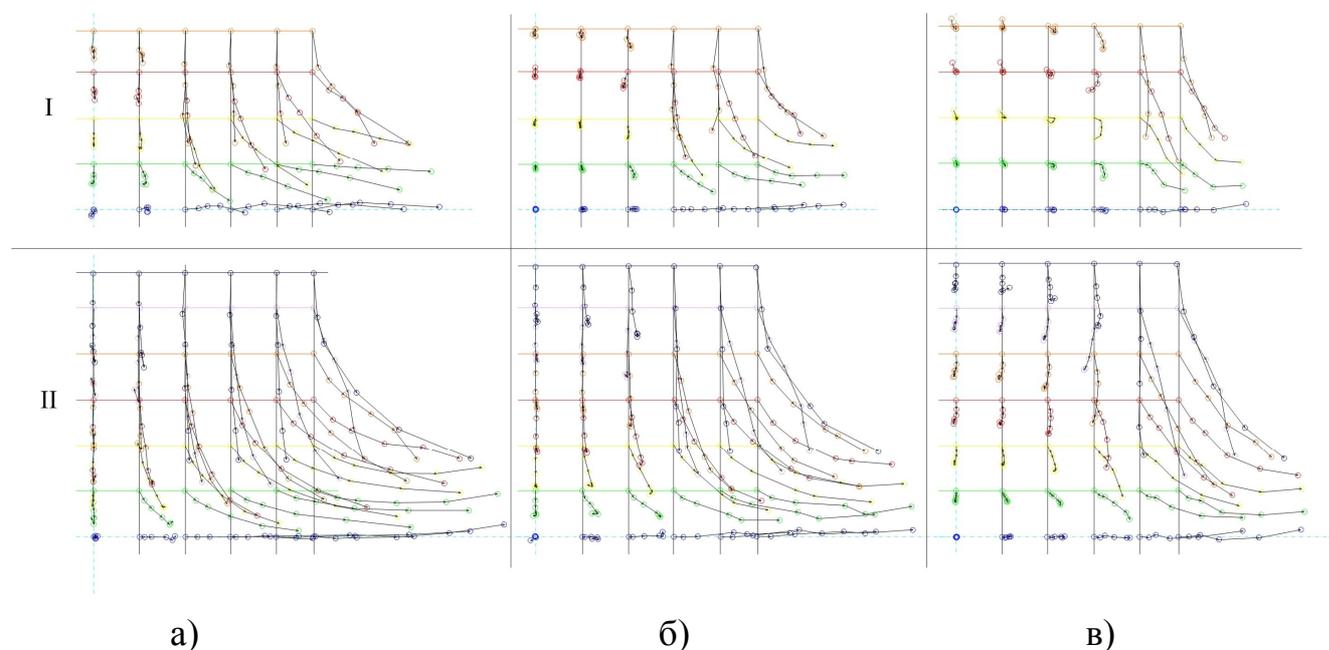


Рисунок 2.26 – Траектории перемещений узлов координатной сетки.

$H_0/D_0 = 0,8$  – I, 1,2 – II;  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (а), 0,55 (б), 0,72 (в)

При рассмотрении траекторий можно отметить следующее:

- для заготовок с соотношением  $H_0/D_0 = 0,8$ .

При соотношении  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  перемещение точек, расположенных на горизонтальной оси симметрии происходит в радиальном направлении от оси заготовки. Точки, расположенные на оси заготовки перемещаются в севом направлении к центру заготовки, за исключением точек, расположенных в цапфе

– при обжати более 50% они меняют направление на противоположное – от центра. Точки, расположенные на контактной поверхности, под плоской частью бойка, перемещаются в осевом направлении к горизонтальной плоскости симметрии заготовки на начальной стадии обжатия. При дальнейшем обжати появляется небольшая горизонтальная составляющая, направленная к свободной боковой поверхности. При перемещении точек, расположенных в полотно диска помимо осевой появляется радиальная составляющая, направленная в сторону свободной боковой поверхности, которая увеличивается к горизонтальной плоскости симметрии заготовки.

При соотношении  $D_{отв}/D_0 = 0,55$  перемещение точек, расположенных на горизонтальной оси симметрии происходит в радиальном направлении от оси заготовки, однако перемещение точек, расположенных под цапфой незначительно. Точки, расположенные на оси заготовки в цапфах перемещаются в осевом направлении к центру заготовки только на начальной стадии обжатия, а при дальнейшем обжати они меняют направление на противоположное – от центра. Значительного перемещения точек, расположенных под цапфой вблизи пересечения осей не наблюдается. Точки, расположенные на контактной поверхности, под плоской частью бойка, перемещаются в осевом направлении к горизонтальной плоскости симметрии заготовки. При перемещении точек, расположенных в полотно диска помимо осевой появляется радиальная составляющая, направленная в сторону свободной боковой поверхности, которая увеличивается к горизонтальной плоскости симметрии заготовки.

При соотношении  $D_{отв}/D_0 = 0,72$  перемещение точек, расположенных на горизонтальной оси симметрии происходит в радиальном направлении от оси заготовки, однако перемещение точек, расположенных под цапфой незначительно. Точки, расположенные на оси заготовки в цапфах перемещаются в осевом направлении от центра заготовки. Значительного перемещения точек, расположенных под цапфой вблизи пересечения осей не наблюдается. Точки, расположенные на контактной поверхности, под плоской частью бойка, перемещаются в осевом направлении к горизонтальной плоскости симметрии

заготовки с небольшой горизонтальной составляющей, направленной к свободной боковой поверхности. При перемещении точек, расположенных в полотно диска помимо осевой появляется радиальная составляющая. Под плоской частью бойка она направлена в сторону свободной боковой поверхности и увеличивается к горизонтальной оси, а под цапфой – к оси, и уменьшается к горизонтальной плоскости симметрии заготовки.

- для заготовок с соотношением  $H_0/D_0 = 1,2$ .

При соотношении  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  перемещение точек, расположенных на горизонтальной оси симметрии происходит в радиальном направлении от оси заготовки. Точки, расположенные на оси заготовки перемещаются в осевом направлении к центру заготовки. Перемещения остальных точек происходят в осевом направлении к горизонтальной плоскости симметрии с появлением радиальной составляющей, направленной к свободной боковой поверхности и увеличивающейся к горизонтальной плоскости симметрии и к свободной боковой поверхности.

При соотношении  $D_{отв}/D_0 = 0,55$  перемещение точек, расположенных на горизонтальной оси симметрии происходит в радиальном направлении от оси заготовки. Точки, расположенные на оси заготовки перемещаются в осевом направлении к центру заготовки. Перемещения остальных точек происходят в осевом направлении к горизонтальной плоскости симметрии с появлением радиальной составляющей, направленной к свободной боковой поверхности и увеличивающейся к горизонтальной плоскости симметрии и к свободной боковой поверхности.

При соотношении  $D_{отв}/D_0 = 0,72$  перемещение точек, расположенных на горизонтальной оси симметрии происходит в радиальном направлении от оси заготовки. Точки, расположенные на оси заготовки перемещаются в осевом направлении к центру заготовки. Перемещения точек, расположенных под цапфой происходят в осевом направлении к горизонтальной плоскости симметрии с появлением радиальной составляющей, направленной к оси заготовки (на  $1/4$  высоты заготовки) и направленной от оси заготовки (в средней части высоты

заготовки). Перемещения точек, расположенных под плоской частью бойка происходят в осевом направлении к горизонтальной оси с появлением радиальной составляющей, направленной к свободной боковой поверхности и увеличивающейся к горизонтальной плоскости симметрии и к свободной боковой поверхности.

Рассматривая вместе все 6 графиков траекторий, установили:

Длины траекторий перемещения уменьшаются с увеличением соотношения  $D_{отв}/D_0$  для выбранного соотношения  $H_0/D_0$ .

При увеличении соотношения  $D_{отв}/D_0$  границы области с небольшими перемещениями, расположенной вблизи пересечения осей заготовки, увеличиваются.

Радиальная составляющая перемещений увеличивается к свободной боковой поверхности и к горизонтальной плоскости симметрии заготовки.

При увеличении соотношения  $D_{отв}/D_0$  в перемещениях некоторых точек появляется горизонтальная составляющая, направленная к оси заготовки, т.е. в противоположном направлении, как следствие затекания металла в отверстие бойка.

## Глава 3 Исследование зон деформации и затекания заготовки в отверстия бойков

### 3.1 Зоны деформации

Для исследования конфигурации и границ зон деформации из всего массива выбрали 12 образцов с самыми разными зонами (рисунок 3.1 и рисунок 3.2).

Чистый свинец рекристаллизуется при комнатной температуре и на нем можно наблюдать межзеренную деформацию (рисунок 3.1).

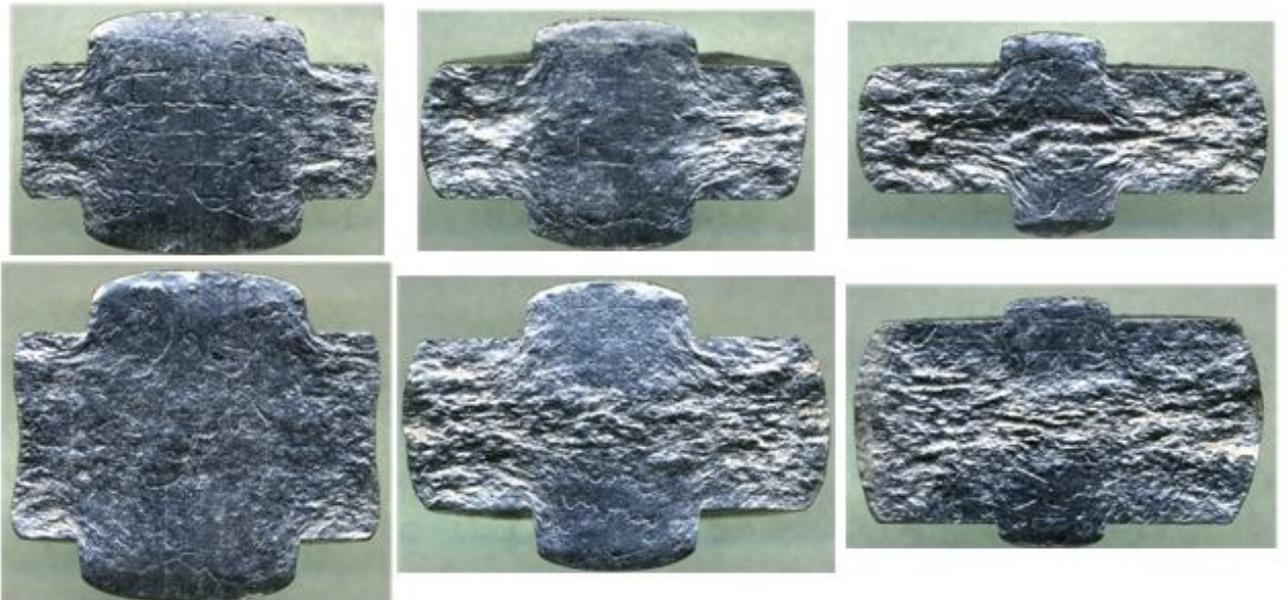
Как следует из полученных фотографий, вблизи отверстия в бойках имеет место «жесткая зона» – зона затрудненной деформации. Это явление сохраняется для всех исследованных соотношений  $D_{\text{отв}}/D_0$ ,  $D_0/H_0$  и для всех степеней обжатия.

Фотографии координатных сеток (рисунок 3.2) дают количественную информацию, на основе которой построены траектории перемещения узлов координатной сетки, рассчитаны поля двух главных местных деформаций. Координатные сетки дали возможность определить конфигурацию и границы зон деформации.

Характер координатных сеток хорошо подтверждает вывод о том, что для всех исследованных соотношений геометрических размеров заготовок, инструмента и для всех исследованных степеней обжатия вблизи отверстия сохраняется зона затрудненной деформации.

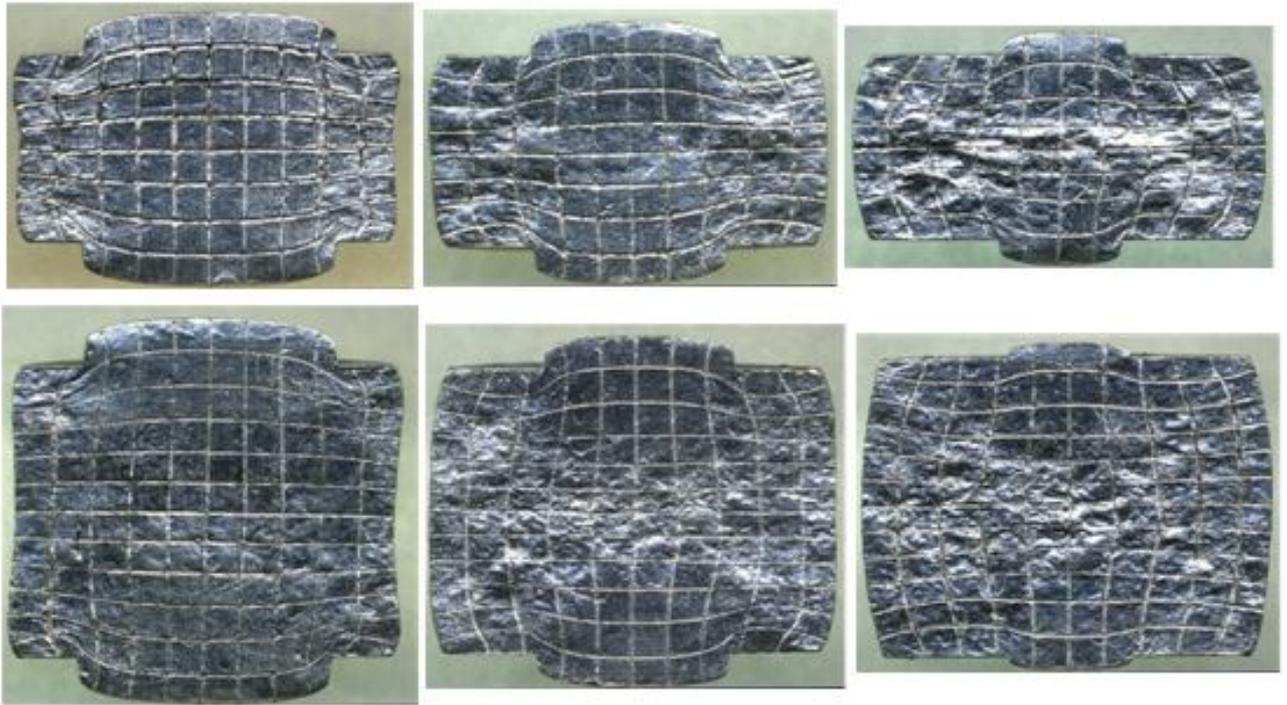


а)

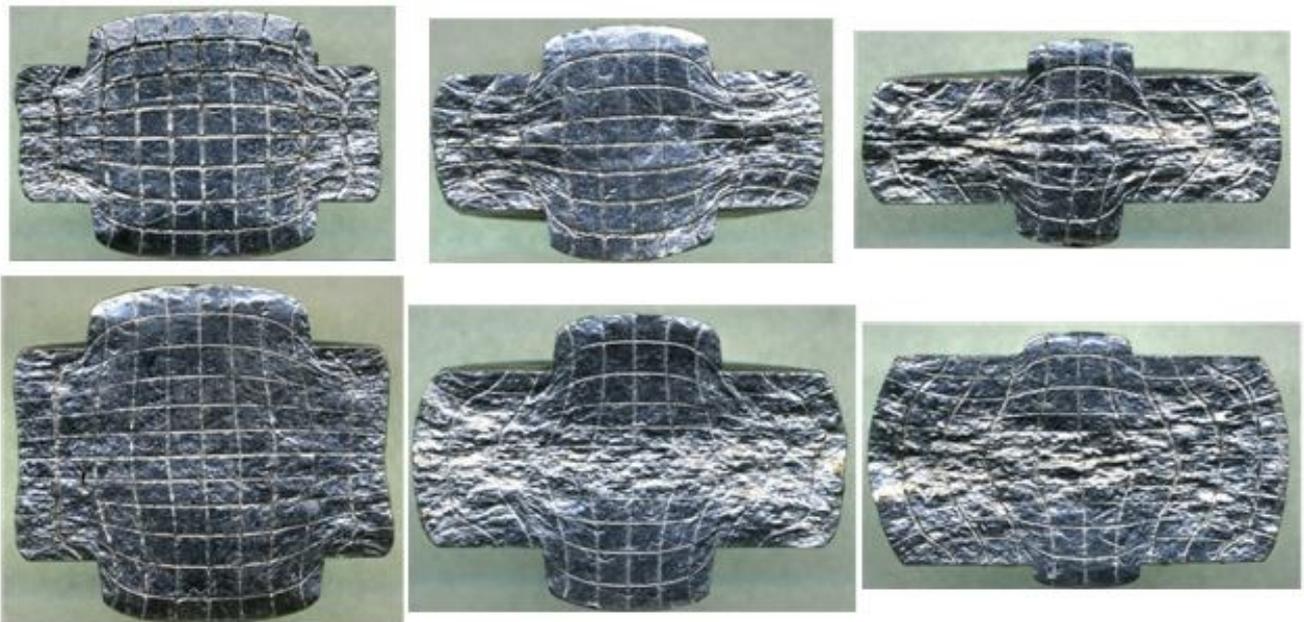


б)

Рисунок 3.1 – Вид поверхностей раздела составных образцов, выбранных для анализа зон деформации; обжатия на 30% (а) и 50% (б)



а)



б)

Рисунок 3.2 – Фотографии координатных сеток на вторых половинах образцов по рисунку 3.1

### 3.2 Затекание заготовки в отверстия бойков

Затекание материала в отверстие бойка и форма свободной боковой поверхности исследованы при обжатии слоистых заготовок: рассчитана осевая компонента местной нормальной деформации (утонения или утолщения слоя), определено положение нейтральной поверхности, от которой материал вытесняется в отверстия бойков или в пространство между ними. В научно-технической литературе исчерпывающей информации по формоизменению заготовки нет.

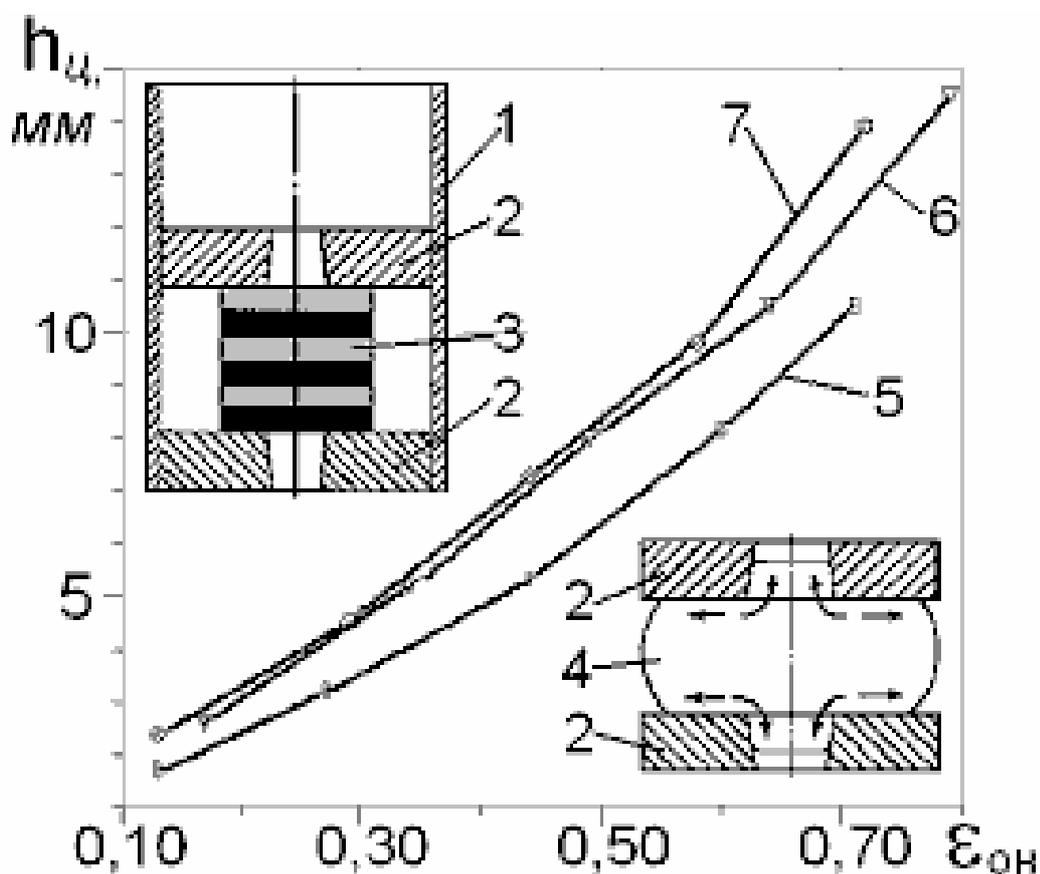


Рисунок 3.3 –Затекание ( $h_c$ ) материала заготовки в отверстия бойков в зависимости от степени обжатия ( $\epsilon_{oh}$ ) при осадке: 1 – контейнер; 2 – бойки; 3 – заготовка, исходное положение; 4 – заготовка в процессе осадки. Осадка бойками с  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (5), 0,55 (6) и 0,72 (7)



Зависимости изменения относительной суммарной высоты заготовки ( $H/H_0$ ) от относительной высоты заготовки ( $H_0/D_0$ ) и относительного диаметра отверстия ( $D_{отв}/D_0$ ) показаны на рисунке 3.5.

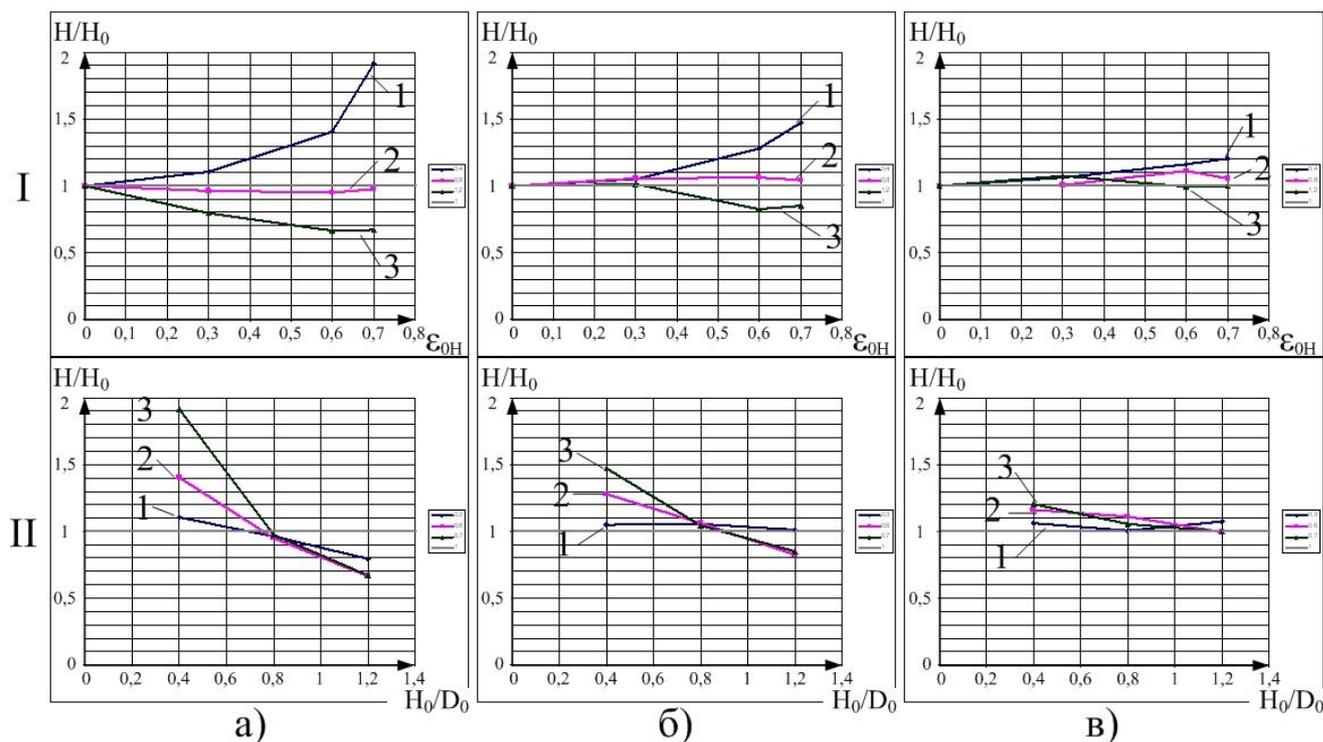


Рисунок 3.5 – Графики изменения суммарной относительной высоты заготовки  $H/H_0$  в зависимости от степени обжатия  $\epsilon_{0H}$  (позиции I) при различных соотношениях  $H_0/D_0$  и в зависимости от соотношения  $H_0/D_0$  (позиции II) при различных степенях обжатия.  $H_0/D_0 = 0,4 - 1, 0,8 - 2, 1,2 - 3$ ;  $\epsilon_{0H} = 0,3 - 1, 0,6 - 2, 0,7 - 3$ ;  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (а),  $0,55$  (б),  $0,72$  (в)

### 3.2.1.1 Относительная величина отверстия $D_{отв}/D_0 = 0,35$

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$ , (рисунок 3.5, I, а, 1):

- при увеличении степени обжатия суммарная высота заготовки увеличивается и превышает высоту исходной заготовки на всех стадиях обжатия (при  $\epsilon_{0H} = 0,6$  – в 1,4 раза, при  $\epsilon_{0H} = 0,7$  – в 1,9 раза).

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,8$ , (рисунок 3.5, I, а, 2):

- при увеличении степени обжатия суммарная высота заготовки незначительно уменьшается до степени обжатия  $\epsilon_{0H} = 0,3$  и при дальнейшем обжатии до  $\epsilon_{0H} = 0,6$  не изменяется, а затем незначительно увеличивается.

Суммарная высота заготовки на всех стадиях обжатия меньше высоты исходной заготовки.

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 1,2$ , (рисунок 3.5, I, а, 3):

- при увеличении степени обжатия до  $\epsilon_{0H} = 0,6$  суммарная высота заготовки уменьшается, а при дальнейшем обжатии не изменяется. Суммарная высота заготовки на всех стадиях обжатия меньше высоты исходной заготовки.

Для этого же соотношения  $D_{отв}/D_0 = 0,35$ , рассмотрим изменение суммарной высоты заготовки для каждой степени обжатия  $\epsilon_{0H}$  при изменении соотношения исходных геометрических размеров  $H_0/D_0$  заготовки (рисунок 3.5, II, а). Суммарная высота заготовки уменьшается для всех степеней обжатия при увеличении соотношения  $H_0/D_0$ .

На всех стадиях обжатия суммарная высота заготовки с соотношением размеров  $H_0/D_0 = 0,4$  превышает высоту исходной заготовки, с соотношением  $H_0/D_0 = 0,8$  – практически равна высоте исходной заготовки, а с соотношением  $H_0/D_0 = 1,2$  – меньше высоты исходной заготовки.

### 3.2.1.2 Относительная величина отверстия $D_{отв}/D_0 = 0,55$

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$ , (рисунок 3.5, I, б, 1):

- при увеличении степени обжатия суммарная высота заготовки увеличивается. Суммарная высота заготовки на всех стадиях обжатия превышает высоту исходной заготовки (при  $\epsilon_{0H} = 0,7$  – в 1,5 раза).

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,8$ , (рисунок 3.5, I, б, 2):

- при увеличении степени обжатия до  $\epsilon_{0H} = 0,3$  суммарная высота заготовки незначительно увеличивается и не изменяется при дальнейшем обжатии. Суммарная высота заготовки превышает высоту исходной заготовки на всех стадиях обжатия.

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 1,2$ , (рисунок 3.5, I, б, 3):

- при увеличении степени обжатия до  $\epsilon_{0H} = 0,3$  суммарная высота заготовки не изменяется и равна высоте исходной заготовки. При дальнейшем обжатии суммарная высота заготовки уменьшается и становится меньше высоты исходной заготовки.

Для этого же соотношения  $D_{отв}/D_0$  изменение суммарной высоты заготовки для каждой степени обжатия  $\epsilon_{0H}$  при изменении соотношения исходных геометрических размеров  $H_0/D_0$  заготовки показано на рисунке 3.5, II, б.

При степени обжатия  $\epsilon_{0H} = 0,3$  (рисунок 3.5, II, б, 1) суммарная высота заготовок с соотношением размеров  $H_0/D_0 = 0,4$ ;  $0,8$  и  $1,2$  остается практически равной высоте исходной заготовки.

При степени обжатия  $\epsilon_{0H} = 0,6$  и  $0,7$  (рисунок 3.5, II, б, 2, 3) суммарная высота заготовки с соотношением размеров  $H_0/D_0 = 0,4$  превышает высоту исходной заготовки, с соотношением  $H_0/D_0 = 0,8$  – практически равна высоте исходной заготовки, а с соотношением  $H_0/D_0 = 1,2$  – меньше высоты исходной заготовки.

### 3.2.1.3 Относительная величина отверстия $D_{отв}/D_0 = 0,72$

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$ , (рисунок 3.5, I, в, 1):

- при увеличении степени обжатия суммарная высота заготовки увеличивается и превышает высоту исходной заготовки.

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,8$ , (рисунок 3.5, I, в, 2):

- при увеличении степени обжатия до  $\epsilon_{0H} = 0,3$  суммарная высота заготовки не изменяется и равна высоте исходной заготовки. При дальнейшем обжатии суммарная высота заготовки незначительно увеличивается и превышает высоту исходной заготовки.

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 1,2$ , (рисунок 3.5, I, в, 3):

- при увеличении степени обжатия суммарная высота заготовки практически не изменяется и равна высоте исходной заготовки.

Для этого же соотношения  $D_{отв}/D_0$  изменение суммарной высоты заготовки для каждой степени обжатия  $\epsilon_{0H}$  при изменении соотношения исходных геометрических размеров  $H_0/D_0$  заготовки представлено на рисунке 3.5, II, в.

При степени обжатия  $\epsilon_{0H} = 0,3$  (рисунок 3.5, II, в, 1) суммарная высота заготовок с соотношением размеров  $H_0/D_0 = 0,4; 0,8$  и  $1,2$  практически не меняется и равна или незначительно превышает высоту исходной заготовки.

При степени обжатия  $\epsilon_{0H} = 0,6$  и  $0,7$  (рисунок 3.5, II, в, 2, 3) с увеличением высоты исходной заготовки ( $H_0/D_0$ ) суммарная высота заготовки уменьшается и становится равной высоте исходной заготовки.

Затекание заготовки в отверстие бойков оценили по изменению относительной высоты цапфы ( $H_{ц}/H_k$ ) в процессе обжатия. Полученные результаты расчетов показаны на рисунке 3.6.

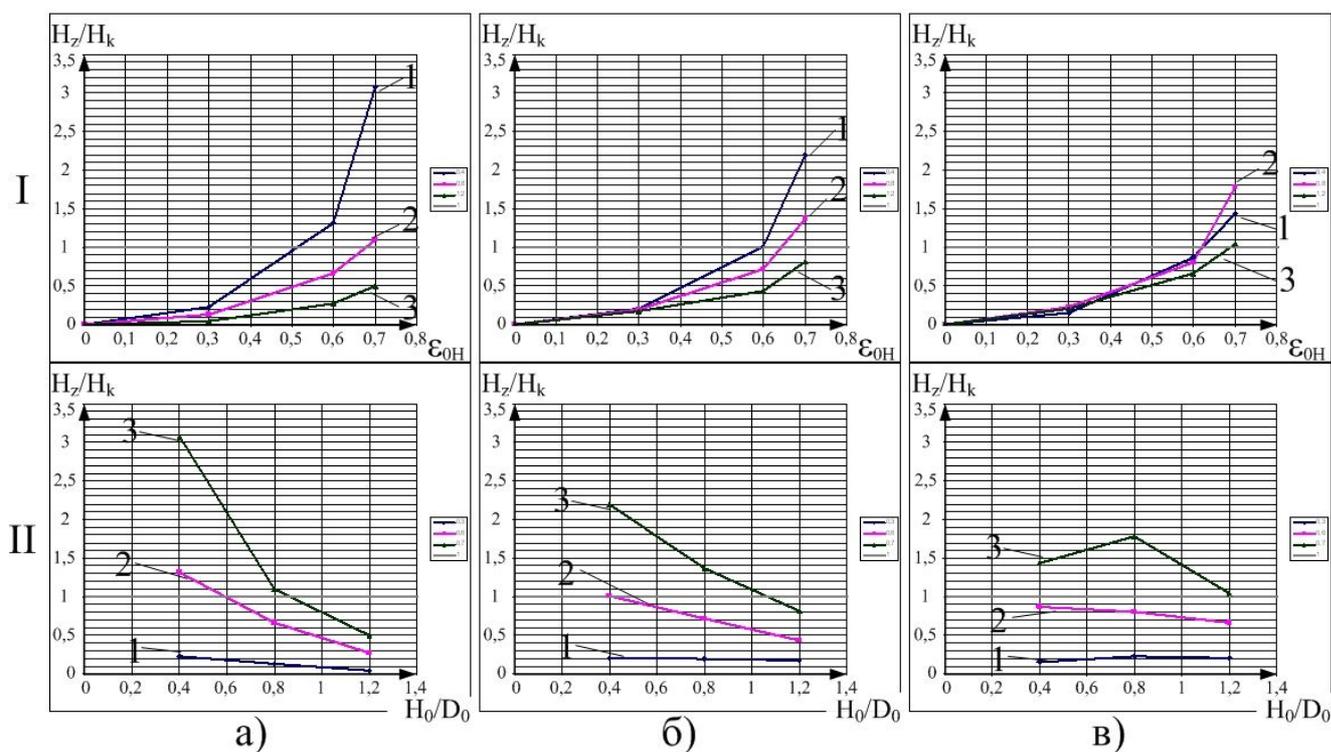


Рисунок 3.6 – Графики изменения относительной высоты цапфы  $H_z/H_k$  в зависимости от степени обжатия  $\epsilon_{0H}$  (позиции I) при различных соотношениях  $H_0/D_0$  и в зависимости от соотношения  $H_0/D_0$  (позиции II) при различных степенях обжатия.  $H_0/D_0 = 0,4 - 1, 0,8 - 2, 1,2 - 3$ ;  $\epsilon_{0H} = 0,3 - 1, 0,6 - 2, 0,7 - 3$ ;  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (а),  $0,55$  (б),  $0,72$  (в)

#### 3.2.1.4 Относительная величина отверстия $D_{отв}/D_0 = 0,35$

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$ , (рисунок 3.6, I, а, 1):

- увеличение высоты цапфы происходит на всех стадиях обжатия. До степени обжатия  $\epsilon_{0H} = 0,5$  высота цапфы меньше толщины полотна диска. При степенях обжатия больше 0,5 высота цапфы превышает толщину полотна диска заготовки. При максимальной из рассматриваемых степени обжатия, высота цапфы превышает толщину полотна диска в 3 раза.

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,8$ , (рисунок 3.6, I, а, 2):

- высота цапфы увеличивается на всех стадиях обжатия. Высота цапфы меньше толщины полотна диска при степенях обжатия до  $\varepsilon_{0H} = 0,67$ , а при степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,7$  превышает ее в 1,1 раза.

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 1,2$ , (рисунок 3.6, I, а, 3):

- при увеличении степени обжатия высота цапфы увеличивается. Высота цапфы на всех стадиях обжатия меньше толщины полотна диска и при степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,7$  – в 2 раза.

Для этого же соотношения  $D_{отв}/D_0$  изменение высоты цапфы для каждой степени обжатия  $\varepsilon_{0H}$  при изменении соотношения исходных геометрических размеров  $H_0/D_0$  заготовки представлено на рисунке 3.6, II, а.

При увеличении высоты исходной заготовки высота цапфы уменьшается для всех степеней обжатия.

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,3$  (рисунок 3.6, II, а, 1) высота цапфы меньше толщины полотна диска и уменьшается от 0,2 до 0,03 при увеличении высоты исходной заготовки ( $H_0/D_0$ ).

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,6$  (рисунок 3.6, II, а, 2) высота цапфы превышает толщину полотна диска в 1,3 раза для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$ . При увеличении соотношения  $H_0/D_0$  высота цапфы уменьшается до 0,3, при этом высота цапфы меньше толщины полотна диска заготовки.

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,7$  (рисунок 3.6, II, а, 3) высота цапфы для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$  превышает толщину диска в 3 раза. При увеличении соотношения  $H_0/D_0$  до 0,8 высота цапфы практически равна толщине полотна диска заготовки. При дальнейшем увеличении соотношения  $H_0/D_0$  высота цапфы уменьшается до половины толщины полотна диска заготовки.

3.2.1.5 Относительная величина отверстия  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,55$ 

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$ , (рисунок 3.6, I, б, 1):

- при увеличении степени обжатия высота цапфы увеличивается. До степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,6$  высота цапфы меньше толщины полотна диска. При дальнейшем обжатии высота цапфы превышает толщину полотна диска (при максимальном обжатии – в 2,2 раза).

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,8$ , (рисунок 3.6, I, б, 2):

- при увеличении степени обжатия высота цапфы увеличивается. До степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,65$  высота цапфы меньше толщины полотна диска. При дальнейшем обжатии высота цапфы превышает толщину полотна диска (при максимальном обжатии – в 1,3 раза).

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 1,2$ , (рисунок 3.6, I, б, 3):

- высота цапфы увеличивается на всех стадиях обжатия, но не превышает толщину полотна диска.

Для этого же соотношения  $D_{\text{отв}}/D_0$  изменение высоты цапфы для каждой степени обжатия  $\varepsilon_{0H}$  при изменении соотношения исходных геометрических размеров  $H_0/D_0$  заготовки представлено на рисунке 3.6, II, б.

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,3$  (рисунок 3.6, II, б, 1) высота цапфы составляет 0,2 толщины полотна диска и не меняется при увеличении соотношения исходных размеров заготовки ( $H_0/D_0$ ).

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,6$  (рисунок 3.6, II, б, 2) высота цапфы для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$  равна толщине полотна диска. При увеличении соотношения  $H_0/D_0$  высота цапфы уменьшается и составляет половину толщины полотна диска заготовки.

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,7$  (рисунок 3.6, II, б, 3) высота цапфы для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$  превышает толщину

полотна диска в 2,2 раза. При увеличении соотношения  $H_0/D_0$  высота цапфы уменьшается и составляет 1,35 толщины полотна диска для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,8$ ; для заготовки с соотношением  $H_0/D_0 = 1,2$  высота цапфы меньше толщины полотна диска и составляет 0,8.

### 3.2.1.6 Относительная величина отверстия $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,72$

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$ , (рисунок 3.6, I, в, 1):

- при увеличении степени обжатия высота цапфы увеличивается. До степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,62$  высота цапфы меньше толщины полотна диска. При дальнейшем обжатии высота цапфы превышает толщину полотна диска (при максимальном обжатии – в 1,4 раза).

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,8$ , (рисунок 3.6, I, в, 2):

- при увеличении степени обжатия высота цапфы увеличивается. До степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,62$  высота цапфы меньше толщины полотна диска. При дальнейшем обжатии высота цапфы превышает толщину полотна диска (при максимальном обжатии – в 1,8 раза).

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 1,2$ , (рисунок 3.6, I, в, 3):

- при увеличении степени обжатия высота цапфы увеличивается. На всех стадиях обжатия высота цапфы меньше толщины полотна диска, и при обжатии  $\varepsilon_{0H} = 0,7$  становится равной толщине полотна диска.

Для этого же соотношения  $D_{\text{отв}}/D_0$  изменение высоты цапфы для каждой степени обжатия  $\varepsilon_{0H}$  при изменении соотношения исходных геометрических размеров  $H_0/D_0$  заготовки представлено на рисунке 3.6, II, в.

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,3$  (рисунок 3.6, II, в, 1) высота цапфы составляет 0,2 толщины полотна диска и не меняется при увеличении соотношения исходных размеров заготовки.

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,6$  (рисунок 3.6, II, в, 2) высота цапфы меньше толщины полотна диска и уменьшается от 0,9 до 0,6 при увеличении соотношения исходных размеров заготовки.

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,7$  (рисунок 3.6, II, в, 3) высота цапфы превышает толщину полотна диска для рассматриваемых соотношений исходных размеров заготовки. Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$  высота цапфы составляет 1,4 толщины полотна диска. При увеличении соотношения  $H_0/D_0$  до 0,8 высота цапфы увеличивается и составляет 1,8. При дальнейшем увеличении соотношения  $H_0/D_0$  до 1,2 высота цапфы уменьшается и становится равной толщине полотна диска заготовки.

### 3.2.2 Трехмерные изображения

С целью компактного восприятия полученных экспериментальных данных графические зависимости на плоскости дополнили трехмерными изображениями изменений относительной суммарной высоты заготовки ( $H/H_0$ ) и высоты цапфы ( $H_{ц}/H_k$ ) в зависимости от соотношения размеров заготовки ( $H_0/D_0$ ) и относительного диаметра отверстия ( $D_{отв}/D_0$ ) при постадийном обжатии со степенью 0,3, 0,6 и 0,7.

Изменение относительной суммарной высоты  $H/H_0$  заготовки в зависимости от степени обжатия  $\varepsilon_{0H}$  заготовок с соотношением размеров  $H_0/D_0 = 0,4; 0,8$  и  $1,2$  и диаметров отверстий  $D_{отв}/D_0 = 0,35; 0,55$  и  $0,72$  показано на рисунке 3.7. Поверхности построены в системе координат  $\varepsilon_{0H}, H_0/D_0, H/H_0$ .

Затекание заготовки в отверстие бойка охарактеризовали изменением абсолютной  $H_{ц}$  или относительной  $H_{ц}/H_k$  высоты цапфы (рисунок 3.8).

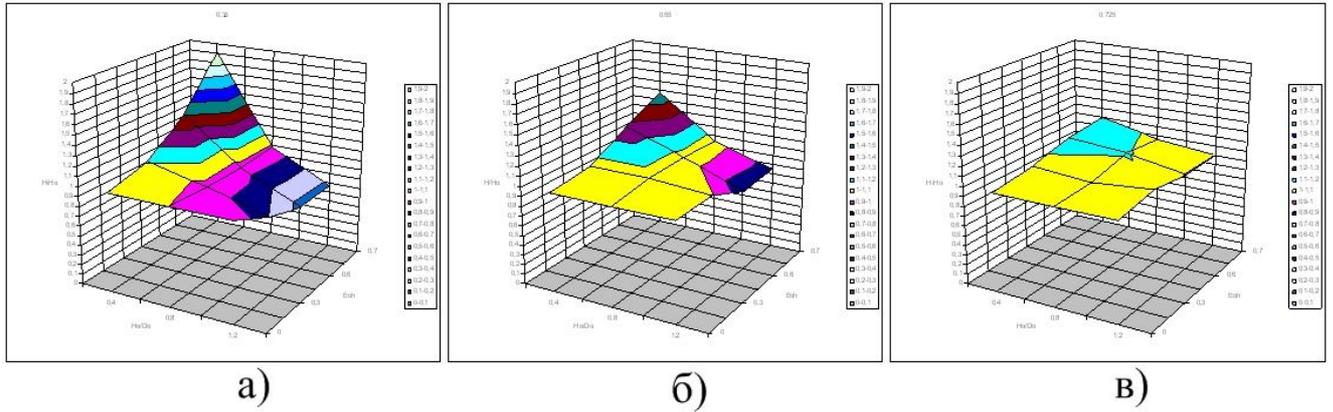


Рисунок 3.7 – Поверхности изменения относительной суммарной высоты  $H/H_0$  заготовки при осадке в зависимости от соотношения размеров  $H_0/D_0$  и степени обжатия  $\varepsilon_{0H}$  для различных диаметров отверстия  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (а),  $0,55$  (б),  $0,72$  (в)

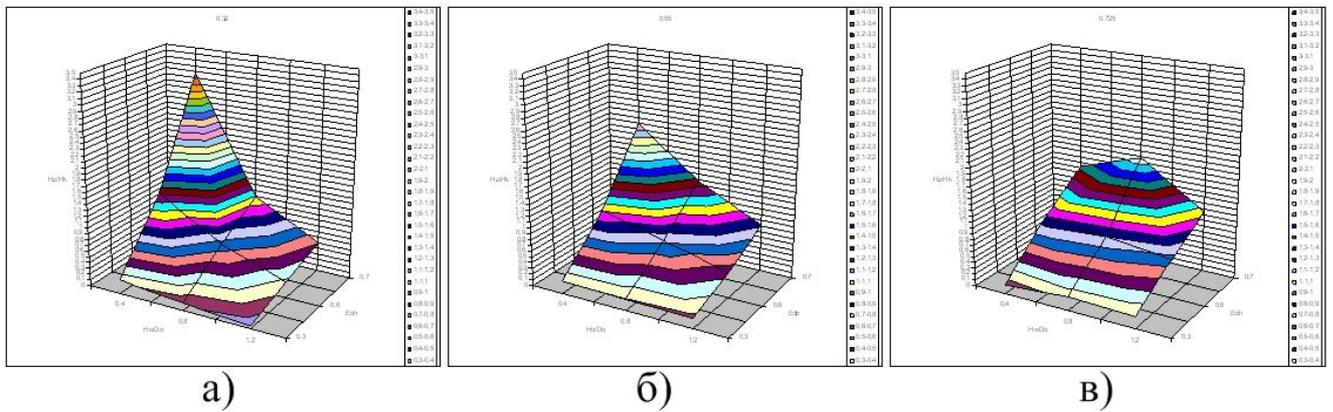


Рисунок 3.8 – Поверхности изменения относительной высоты  $H_{ц}/H_{к}$  цапфы при осадке в зависимости от соотношений размеров  $H_0/D_0$  и степени обжатия  $\varepsilon_{0H}$  для различных диаметров отверстия  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (а),  $0,55$  (б),  $0,725$  (в)

В результате анализа построенных поверхностей установлены следующие зависимости изменения относительной высоты цапфы  $H_{ц}/H_k$  от степени обжатия для трех соотношений  $D_{отв}/D_0$ .

### 3.2.2.1 Для относительной величины отверстия $D_{отв}/D_0 = 0,35$

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$ :

- увеличение высоты цапфы происходит на всех стадиях обжатия. До степени обжатия  $\epsilon_{0H} = 0,5$  высота цапфы меньше толщины полотна диска. При степенях обжатия больше 0,5 высота цапфы превышает толщину полотна диска заготовки. При максимальной из рассматриваемых степени обжатия, высота цапфы превышает толщину полотна диска в 3 раза.

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,8$ :

- высота цапфы увеличивается на всех стадиях обжатия. Высота цапфы меньше толщины полотна диска при степенях обжатия до  $\epsilon_{0H} = 0,67$ , а при степени обжатия  $\epsilon_{0H} = 0,7$  превышает ее в 1,1 раза.

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 1,2$ :

- при увеличении степени обжатия высота цапфы увеличивается. Высота цапфы на всех стадиях обжатия меньше толщины полотна диска и при степени обжатия  $\epsilon_{0H} = 0,7$  – в 2 раза.

Рассмотрим влияние соотношений геометрических размеров исходной заготовки  $H_0/D_0$  на изменение высоты цапфы для каждой степени обжатия  $\epsilon_{0H}$  для соотношения  $D_{отв}/D_0 = 0,35$ .

При увеличении высоты исходной заготовки высота цапфы уменьшается для всех степеней обжатия.

При степени обжатия  $\epsilon_{0H} = 0,3$  высота цапфы меньше толщины полотна диска и уменьшается от 0,2 до 0,03 толщины полотна диска заготовки при увеличении высоты исходной заготовки ( $H_0/D_0$ ).

При степени обжатия  $\epsilon_{0H} = 0,6$  высота цапфы превышает толщину полотна диска в 1,3 раза для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$ .

При увеличении соотношения  $H_0/D_0$  высота цапфы уменьшается до 0,3 толщины полотна диска, при этом высота цапфы меньше толщины полотна диска заготовки.

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,7$  высота цапфы для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$  превышает толщину диска в 3 раза. При увеличении соотношения  $H_0/D_0$  до 0,8 высота цапфы практически равна толщине полотна диска заготовки. При дальнейшем увеличении соотношения  $H_0/D_0$  высота цапфы уменьшается до половины толщины полотна диска заготовки.

### 3.2.2.2 Для относительной величины отверстия $D_{отв}/D_0 = 0,55$

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$ :

- при увеличении степени обжатия высота цапфы увеличивается. До степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,6$  высота цапфы меньше толщины полотна диска. При дальнейшем обжатии высота цапфы превышает толщину полотна диска (при максимальном обжатии – в 2,2 раза).

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,8$ :

- при увеличении степени обжатия высота цапфы увеличивается. До степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,65$  высота цапфы меньше толщины полотна диска. При дальнейшем обжатии высота цапфы превышает толщину полотна диска (при максимальном обжатии – в 1,3 раза).

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 1,2$ :

- высота цапфы увеличивается на всех стадиях обжатия, но не превышает толщину полотна диска.

Рассмотрим влияние соотношений геометрических размеров исходной заготовки  $H_0/D_0$  на изменение высоты цапфы для каждой степени обжатия  $\varepsilon_{0H}$  для соотношения  $D_{отв}/D_0 = 0,55$ .

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,3$  высота цапфы составляет 0,2 толщины полотна диска и не меняется при увеличении соотношения исходных размеров заготовки ( $H_0/D_0$ ).

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,6$  высота цапфы для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$  равна толщине полотна диска. При увеличении соотношения  $H_0/D_0$  высота цапфы уменьшается и составляет половину толщины полотна диска заготовки.

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,7$  высота цапфы для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$  превышает толщину полотна диска в 2,2 раза. При увеличении соотношения  $H_0/D_0$  высота цапфы уменьшается и составляет 1,35 толщины полотна диска для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,8$ , а для заготовки с соотношением  $H_0/D_0 = 1,2$  высота цапфы меньше толщины полотна диска и составляет 0,8 толщины полотна диска заготовки.

### 3.2.2.3 Для относительной величины отверстия $D_{отв}/D_0 = 0,72$

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$ :

- при увеличении степени обжатия высота цапфы увеличивается. До степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,62$  высота цапфы меньше толщины полотна диска. При дальнейшем обжатии высота цапфы превышает толщину полотна диска (при максимальном обжатии – в 1,4 раза).

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,8$ :

- при увеличении степени обжатия высота цапфы увеличивается. До степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,62$  высота цапфы меньше толщины полотна диска. При дальнейшем обжатии высота цапфы превышает толщину полотна диска (при максимальном обжатии – в 1,8 раза).

Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 1,2$ :

- при увеличении степени обжатия высота цапфы увеличивается. На всех стадиях обжатия высота цапфы меньше толщины полотна диска, и при обжатии  $\varepsilon_{0H} = 0,7$  высота цапфы становится равной толщине полотна диска.

Рассмотрим влияние соотношений геометрических размеров исходной заготовки  $H_0/D_0$  на изменение высоты цапфы для каждой степени обжатия  $\varepsilon_{0H}$  для соотношения  $D_{отв}/D_0 = 0,72$ .

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,3$  высота цапфы составляет 0,2 толщины полотна диска и не меняется при увеличении соотношения исходных размеров заготовки.

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,6$  высота цапфы меньше толщины полотна диска и уменьшается от 0,9 до 0,6 при увеличении соотношения исходных размеров заготовки.

При степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,7$  высота цапфы превышает толщину полотна диска для рассматриваемых соотношений исходных размеров заготовки. Для заготовки с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$  высота цапфы составляет 1,4 толщины полотна диска. При увеличении соотношения  $H_0/D_0$  до 0,8 высота цапфы увеличивается и составляет 1,8 толщины полотна диска. При дальнейшем увеличении соотношения  $H_0/D_0$  до 1,2 высота цапфы уменьшается и становится равной толщине полотна диска заготовки.

Совместное рассмотрение графических зависимостей на плоскости и трехмерных изображений позволило выделить экстремальные соотношения размеров заготовки, величины отверстия и степени обжатия для получения также экстремальных картины изменения слоев в заготовках. Экстремальные соотношения параметров собраны в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Экстремальные соотношения параметров

$\min D_{\text{отв}}$	$\min H_0/D_0$	при $\max \varepsilon_{0H}$
	$\max H_0/D_0$	при $\min \varepsilon_{0H}$
$\max D_{\text{отв}}$	$\min H_0/D_0$	при $\max \varepsilon_{0H}$
	$\max H_0/D_0$	при $\min \varepsilon_{0H}$

Кроме того, замечено, что в заготовке, для которой получено максимальное затекание материала в отверстие, с увеличением степени обжатия течение материала заготовки в радиальном направлении затрудняется, и заполнение отверстия происходит за счет деформации материала в осевой части заготовки

(рисунок 3.9, а). При обжатии заготовок с соотношением  $H_0/D_0 = 1,2$  (рисунок 3.9, б) преобладает осадка всей заготовки, а не затекание материала в отверстие инструмента. Течение материала заготовки при больших степенях обжатия сопровождается переходом свободной боковой поверхности на контактную торцевую (рисунок 3.9, а, в) для всех рассматриваемых соотношений геометрических размеров  $H_0/D_0$  исходной заготовки. При увеличении соотношения  $D_{отв}/D_0$  осадка заготовок происходит с образованием вогнутой бочки (рисунок 3.9, г), что связано с вытеснением материала заготовки в радиальном направлении под плоскими частями инструмента.

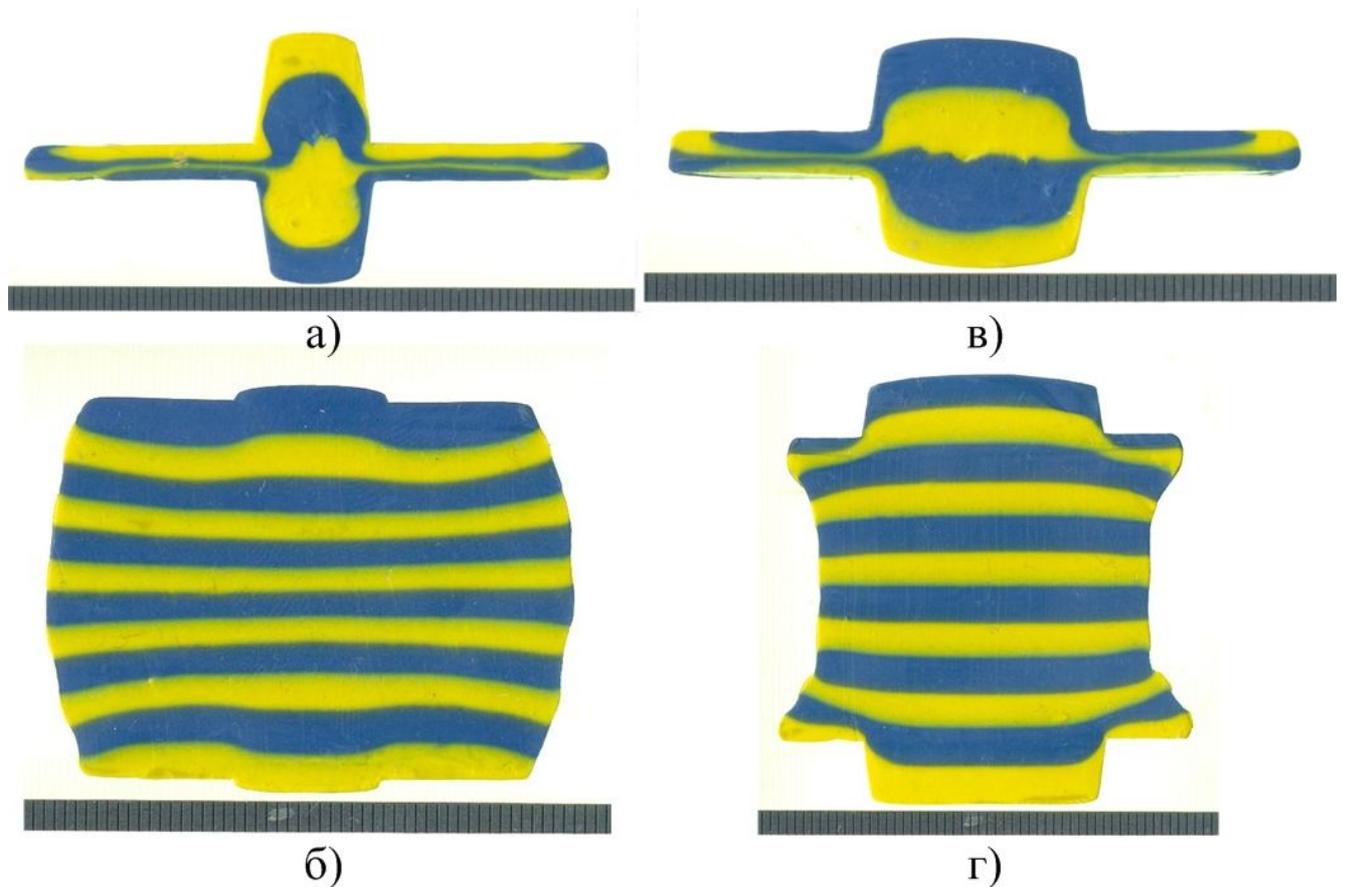


Рисунок 3.9 – Фотографии продольных сечений слоистых заготовок, обжатых на  $\epsilon_{0H} = 0,7$  (а, в) и  $0,3$  (б, г); диаметры осевых отверстий  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (а, б);  $0,55$  (в) и  $0,72$  (г)

Анализ представленных графических зависимостей показывает:

1. Максимальное затекание материала заготовки в отверстие инструмента достигается при соотношении геометрических размеров исходной заготовки  $H_0/D_0 = 0,4$  (т.е. для самой низкой из рассмотренных) и относительной величине отверстия в инструменте  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (для наименьшего из рассмотренных), при степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,7$ .

2. Затекание материала заготовки в отверстие инструмента или течение материала заготовки в радиальном направлении в диск заготовки главным образом определяется соотношением геометрических размеров  $H_0/D_0$  исходной заготовки.

3. Для заготовок с соотношением размеров  $H_0/D_0$  0,4 и 1,2 на затекание в отверстие наибольшее влияние оказывает относительная величина отверстия  $D_{отв}/D_0$ .

4. Для заготовок с соотношением исходных размеров  $H_0/D_0 = 0,4$  при увеличении обжатия, потоки вытеснения в осевом направлении обеспечивают интенсивное увеличение высоты цапф и суммарной высоты заготовки. В заготовках с соотношением размеров  $H_0/D_0 = 0,8$  высота цапф увеличивается без изменения текущей суммарной высоты заготовки. При соотношении исходных размеров заготовки  $H_0/D_0 = 1,2$ , увеличение высоты цапф сопровождается уменьшением суммарной высоты заготовки.

### 3.2.3 Потокораспределение в заготовке

На основании анализа полей деформаций логарифмических (рисунок 2.15) и относительных (рисунок 2.16) выделены нейтральные линии, соответствующие линиям уровня «0». Выделенные нейтральные линии показаны на рисунке 3.10.

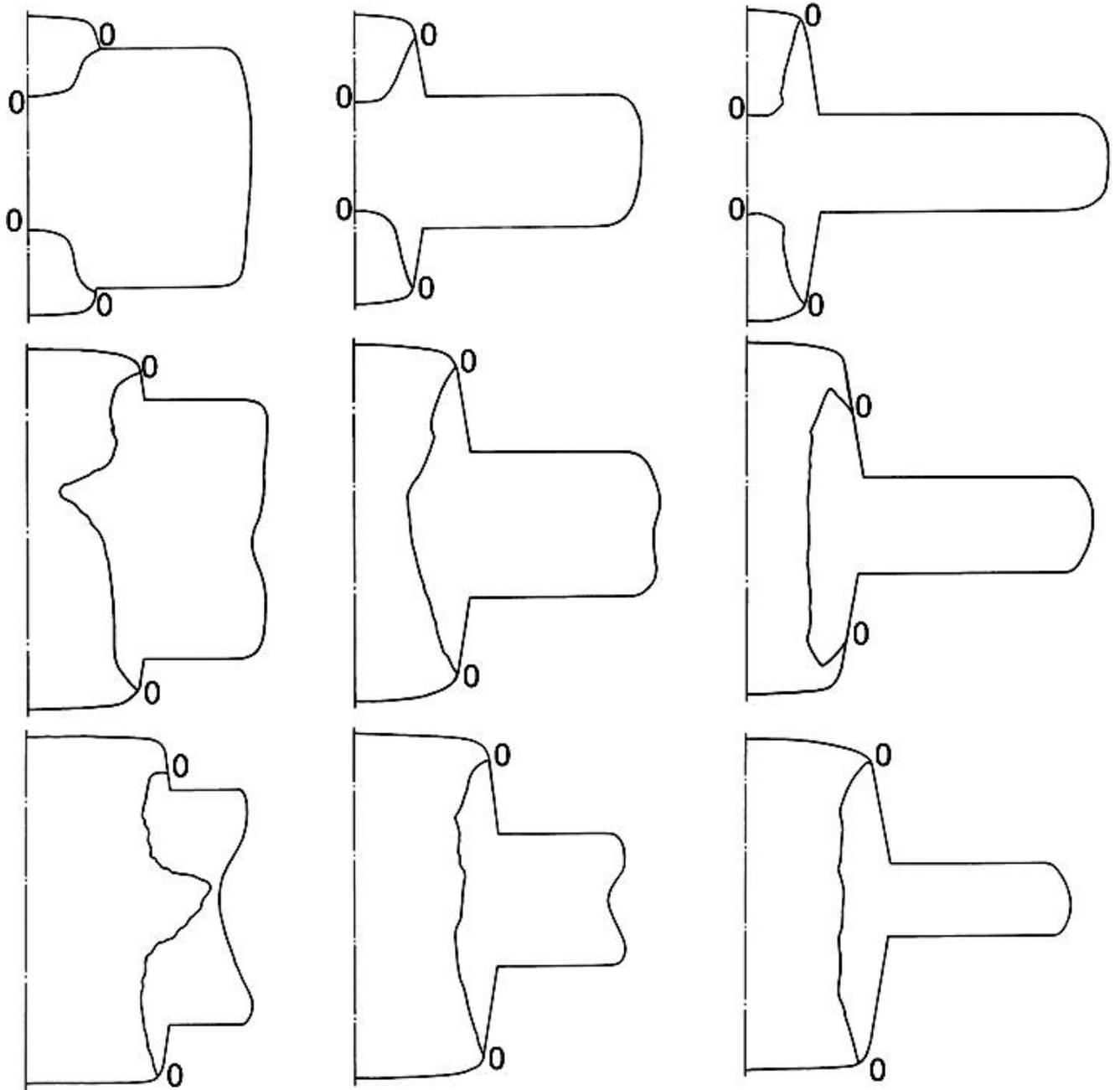


Рисунок 3.10 – Нейтральные линии в образцах по рисунку 2.12, II

На основании рассмотрения расположения нейтральных линий можно показать направления макропотоков материала (рисунок 3.11). Предписанное течение – двухпоточное со стыком потоков  $V$ , а вытеснение  $Q$  – однопоточное, только в одну сторону от нейтральной линии. Материал заготовки перемещается к горизонтальной плоскости. При этом иногда не затекает в отверстие, а жестко

перемещается в него (рисунок 3.11, ряд III). Нейтральные линии являются линиями раздела макропотоков. Однако, встречаются два потока разного характера от одной линии.

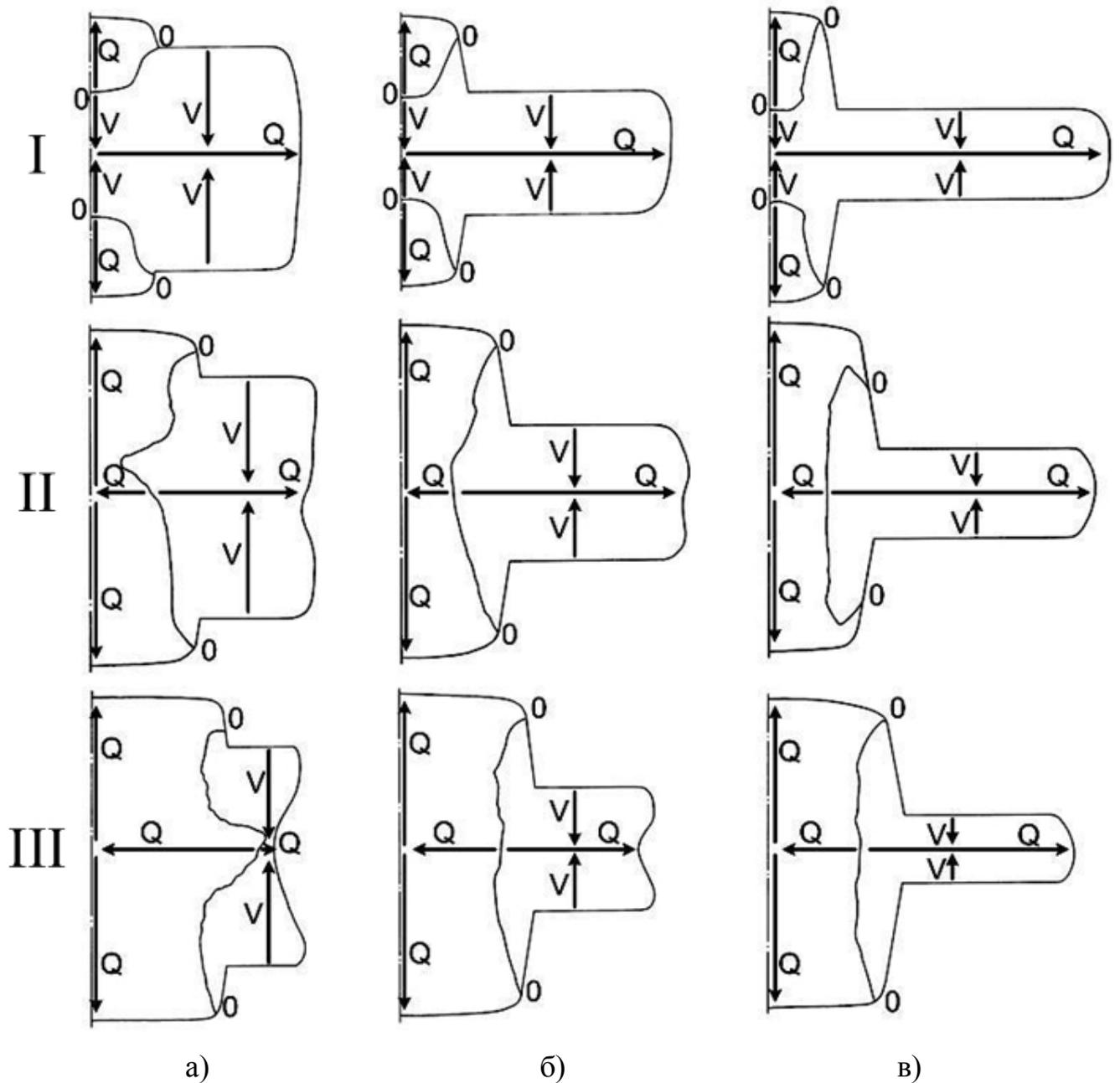


Рисунок 3.11 – Направления предписанных  $V$  и вытеснения  $Q$  потоков в заготовках.  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (I),  $0,55$  (II),  $0,72$  (III);  $\varepsilon_{он} = 0,30$  (а),  $0,60$  (б),  $0,70$  (в)

На основании формоизменения слоев в заготовке, расположения нейтральных линий, а также траекторий узлов координатных сеток составили качественную картину деформационных перемещений в меридиональном сечении (рисунок 3.12).

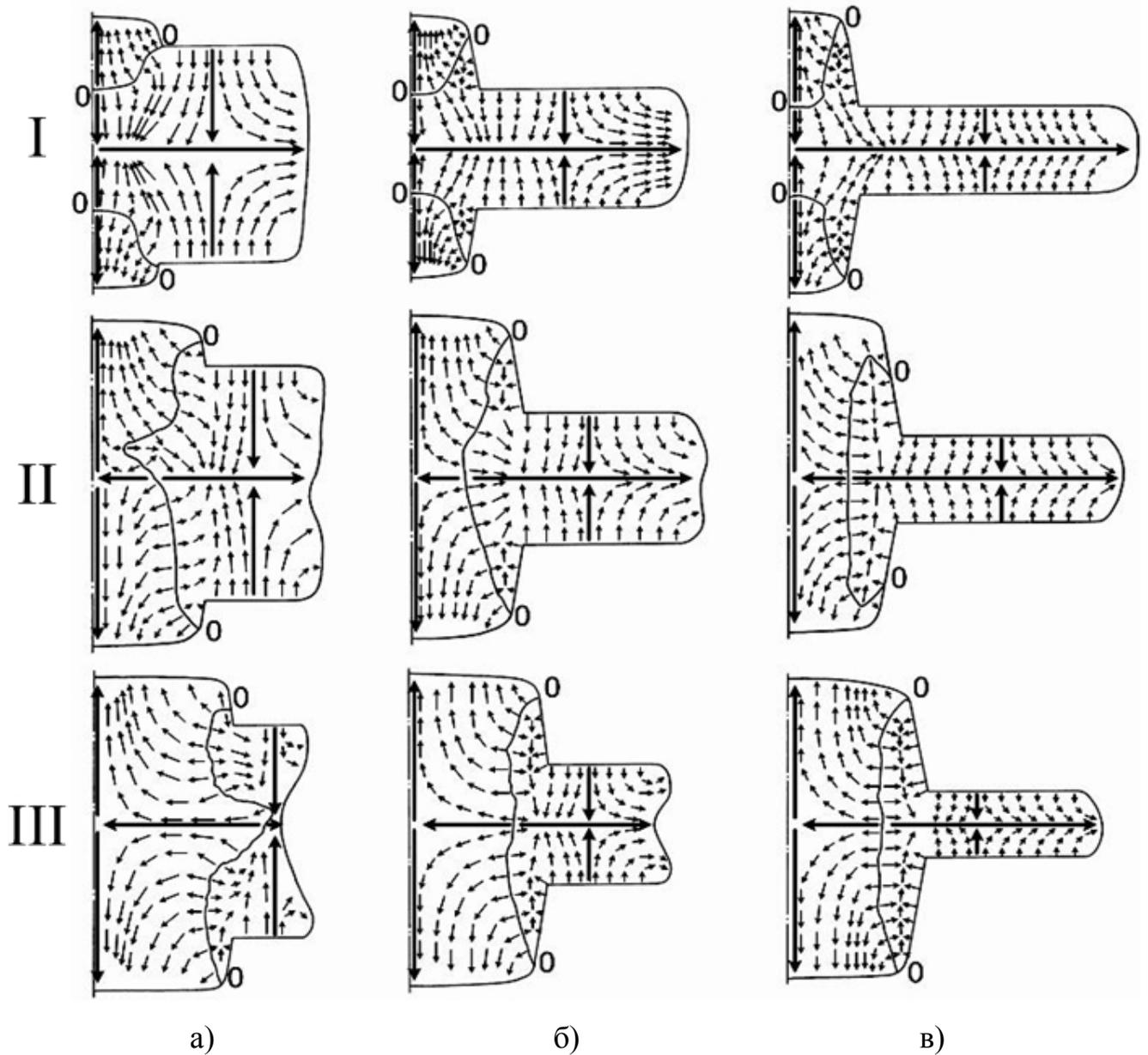


Рисунок 3.12 – Направления деформационных перемещений в заготовках.

$D_{отв}/D_0 = 0,35$  (I),  $0,55$  (II),  $0,72$  (III);  $\varepsilon_{он} = 0,30$  (а),  $0,60$  (б),  $0,70$  (в)

## Глава 4 Исследование конфигурация очага деформации при обжатии бойками с осевым отверстием

### 4.1 Графоаналитические и расчетные построения

В предыдущих разделах работы в исследованиях на слоистых образцах было установлено, что для заготовок с соотношением  $H_0/D_0 = 0,8$  при обжатии за три стадии на 13, 60 и 70% бойками соотношениями размеров отверстия  $D_{отв}/D_0 = 0,35, 0,55$  и  $0,72$  зона минимальных деформаций располагается в цапфах; во всех заготовках в полях местных деформаций присутствуют нейтральные линии, на которых происходит смена знака деформаций; наиболее деформированные области расположены в полотно диска на половине его толщины и на различном расстоянии от оси и свободной боковой поверхности. Эти результаты подтверждены экспериментами на образцах с координатными сетками. Однако, для промышленного применения исследуемого процесса осадки плитами с осевым отверстием необходимо разработать методику построения технологии для любых соотношений геометрических параметров в системе «инструмент-заготовка» и режимов деформирования.

В диссертации рассмотрена задача осесимметричной деформации, относящаяся к классу статически определимых. В настоящее время почти все методы теории обработки металлов давлением основаны на модели идеального жестко – пластического тела. При решении практических задач наибольшее распространение получил графо-аналитический метод построения полей линий скольжения.

Воспользуемся следующими свойствами линий и полей. Для сжатия заготовки плоскими плитами в условиях  $\tau=k$ , линии скольжения одного семейства имеют огибающей контактную прямую, а линии скольжения другого семейства имеют точки возврата на той же прямой. Разрыв скорости, возникающий в некоторой точке контактной поверхности, распространяется к свободной.

Поверхность разрыва является поверхностью максимального касательного напряжения – поверхностью скольжения.

Предельная линия является геометрическим местом центров кривизны – эволютой криволинейных характеристик, а они в свою очередь служат эвольвентами предельной линии.

Если семейство линий скольжения содержит одну прямую, то всё семейство состоит из прямых; прямые отрезки линий скольжения одного семейства, отсекаемые линиями скольжения другого семейства, имеют одинаковые длины.

Если одно из семейств – прямые линии, то предельная линия служит огибающей.

Линия раздела пластической и жёсткой областей является линией скольжения или огибающей линий скольжения.

Линии ветвления совпадают с одной из линий скольжения и являются геометрическим местом точек перегиба другого семейства.

Точки равного давления являются точками раздела течения в двух направлениях.

Блок-схема построения включает следующие этапы:

1. Исходными данными являются компоненты согласованного статически допустимого поля напряжений.

2. Определяют направления выхода линий скольжения на контактную и свободную поверхности.

3. Выполняя свойство ортогональности, строят поле от свободных или от контактных поверхностей.

4. Определяют точки стыковки элементов поля для окончания построений.

Поля линий скольжения построили для обжатия цилиндрической заготовки с отношением высоты к диаметру 0,8 для трех соотношений диаметра осевого отверстия и заготовки  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,35, 0,55, 0,72$  при трех степенях обжатия  $\epsilon_{0H} = 0,3; 0,6; 0,7$  (рисунок 4.1).

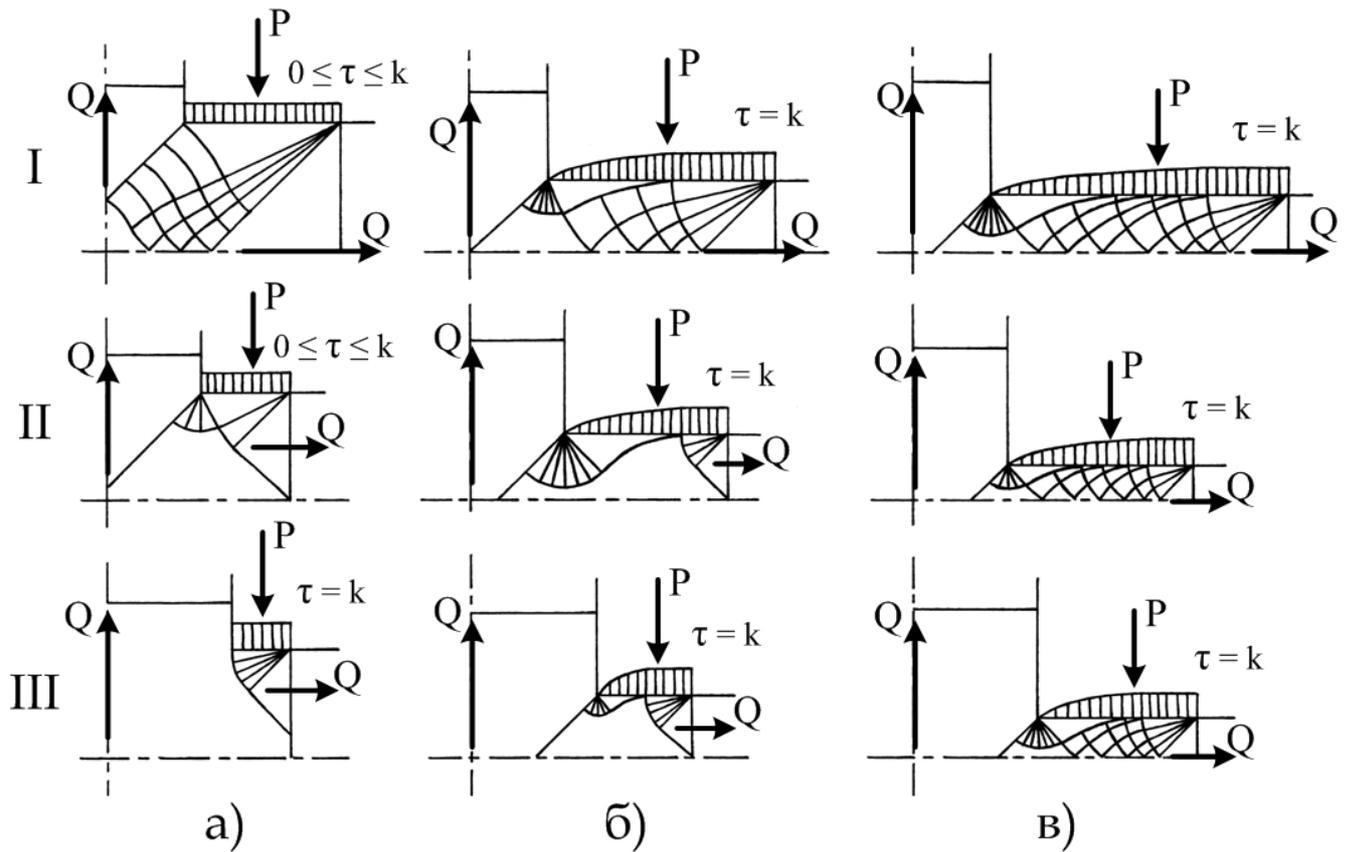


Рисунок 4.1 – Поля линий скольжения при осадке цилиндрических заготовок бойками с осевым отверстием для  $\varepsilon_{0H} = 0,3$  (а),  $0,6$  (б) и  $0,7$  (в) при  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (I),  $0,55$  (II) и  $0,72$  (III): P, Q – направления предписанных потоков пластического течения и потоков вытеснения;  $\tau$  – касательное напряжение трения; k – пластическая постоянная. Показано для 1/4 части заготовки.

На построенных полях можно указать линии раздела пластического течения в пространство между плоскими участками бойков и в отверстия бойков. Установлено, что линия раздела при уменьшении диаметра отверстия смещается к оси заготовки (рисунок 4.1, варианты I-III), а при увеличении степени обжатия – в противоположном направлении (варианты I, II на позициях а-в, а также вариант III на позициях б и в).

При  $D_{отв}/D_0 = 0,72$  и  $\varepsilon_{0H} = 0,3$  (вариант III на позиции а) течение металла происходит только под плоской частью бойков в сторону свободной боковой поверхности.

В части объема заготовки, смещающейся в пространство между плоскими участками бойков, находятся две жесткие зоны: вблизи поверхности контакта заготовки с плоской частью инструмента и в середине заготовки. С увеличением обжатия происходит перемещение металла из этих жестких зон в пластические.

С учетом того, что поля показаны для 1/4 части заготовки из схем, соответствующих вариантам II, III на позициях а и б следует, что вблизи верхней и нижней контактных поверхностей располагаются две пластические зоны и у заготовки образуется двойная бочка. С увеличением обжатия металл из жестких зон переходит в пластические, в результате чего двойная бочка преобразуется в одинарную – выпуклую.

Сравнивая построенные поля линий скольжения и поля местных деформаций, приведенные в Главе 2 (рисунок 2.15), можно заметить, что положение линий раздела течения металла и конфигурация пластических зон хорошо коррелируются с положением нейтральных линий и зонами значительных местных деформаций.

Таким образом метод полей линий скольжения приемлем для решения задачи разработки промышленной технологии.

Есть еще один расчетный метод для получения представлений об очаге деформаций – метод конечных элементов [69]. Этот метод также опробовали для заготовок с тремя соотношениями  $H_0/D_0$ , тремя соотношениями  $D_{отв}/D_0$  при 9 стадиях обжатия  $\epsilon_{0H}$  с шагом 10%. На рисунках 4.2-4.10 показаны результаты моделирования осадки бойками с осевым отверстием.

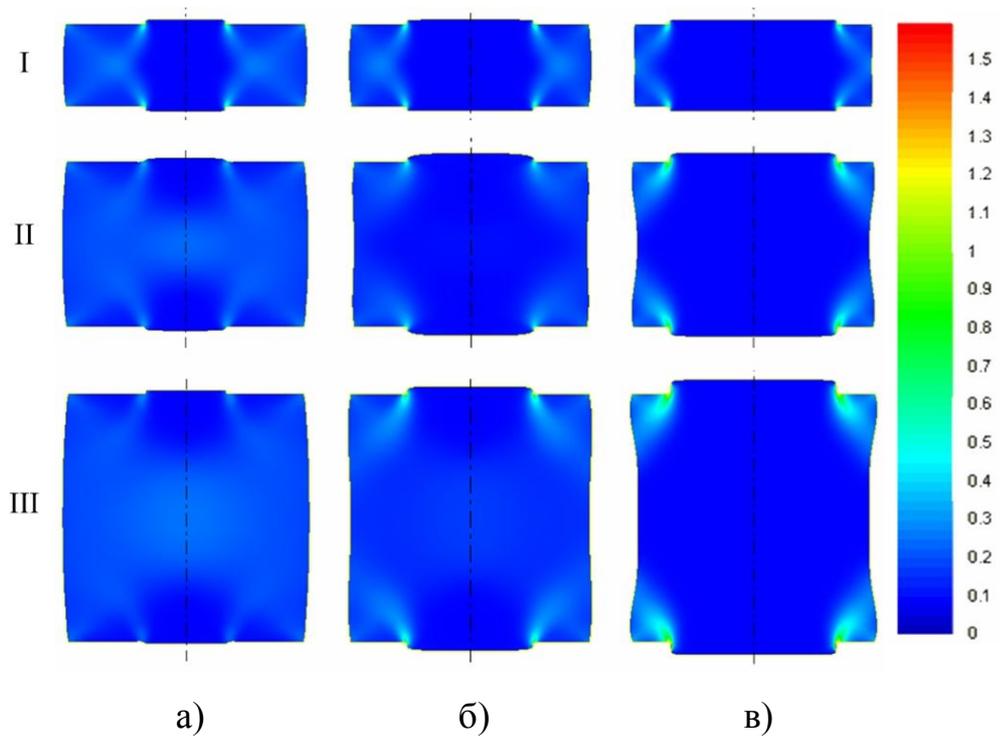


Рисунок 4.2 – Поля деформаций в заготовках, обжатых на 10%.

$D_{отв}/D_0 = 0,35$  (а),  $0,55$  (б) и  $0,72$  (в);  $H_0/D_0 = 0,4$  – I,  $0,8$  – II,  $1,2$  – III

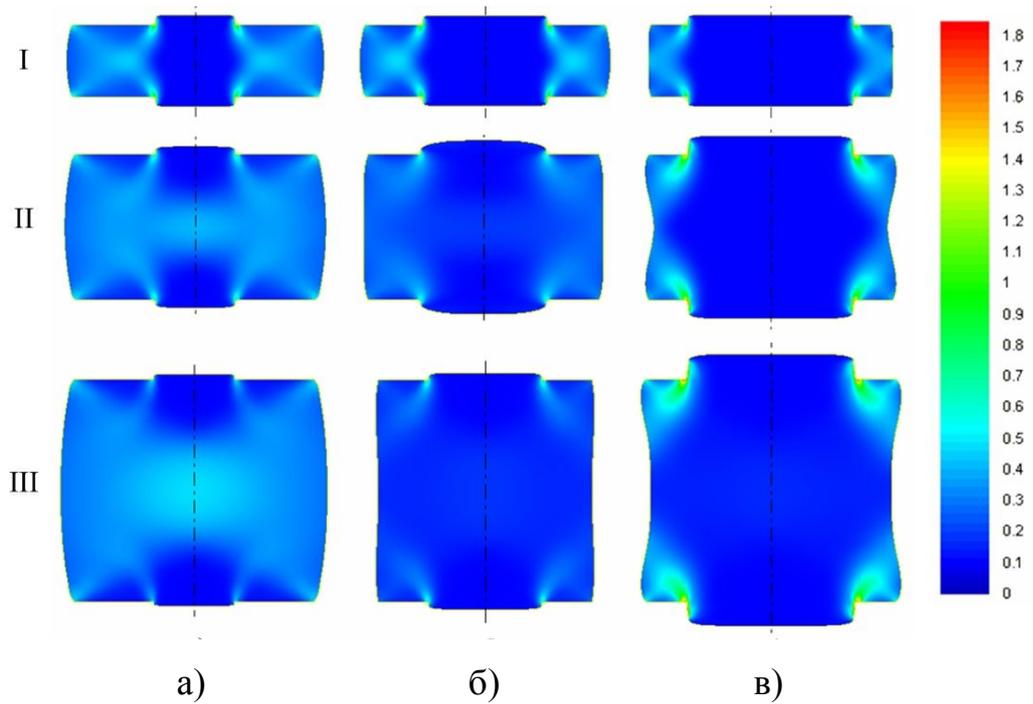


Рисунок 4.3 – Поля деформаций в заготовках, обжатых на 20%.

$D_{отв}/D_0 = 0,35$  (а),  $0,55$  (б) и  $0,72$  (в);  $H_0/D_0 = 0,4$  – I,  $0,8$  – II,  $1,2$  – III

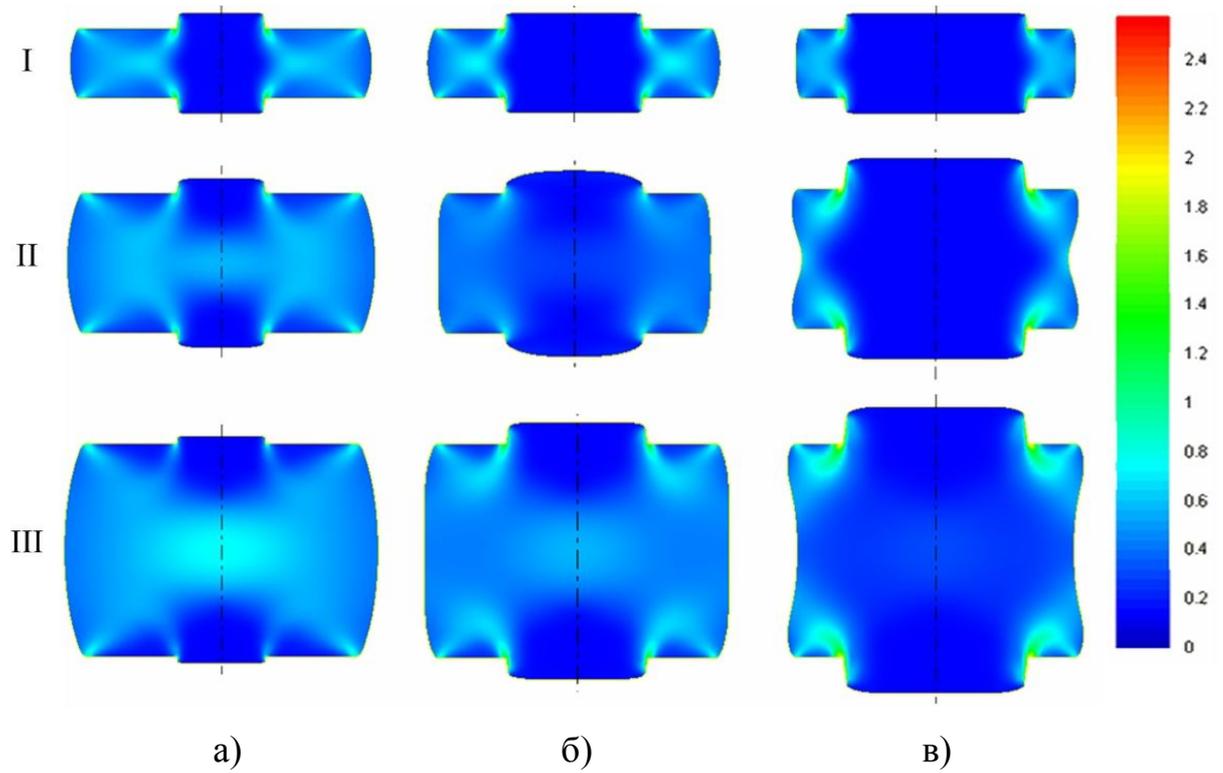


Рисунок 4.4 – Поля деформаций в заготовках, обжатых на 30%.

$D_{отв}/D_0 = 0,35$  (а),  $0,55$  (б) и  $0,72$  (в);  $H_0/D_0 = 0,4$  – I,  $0,8$  – II,  $1,2$  – III

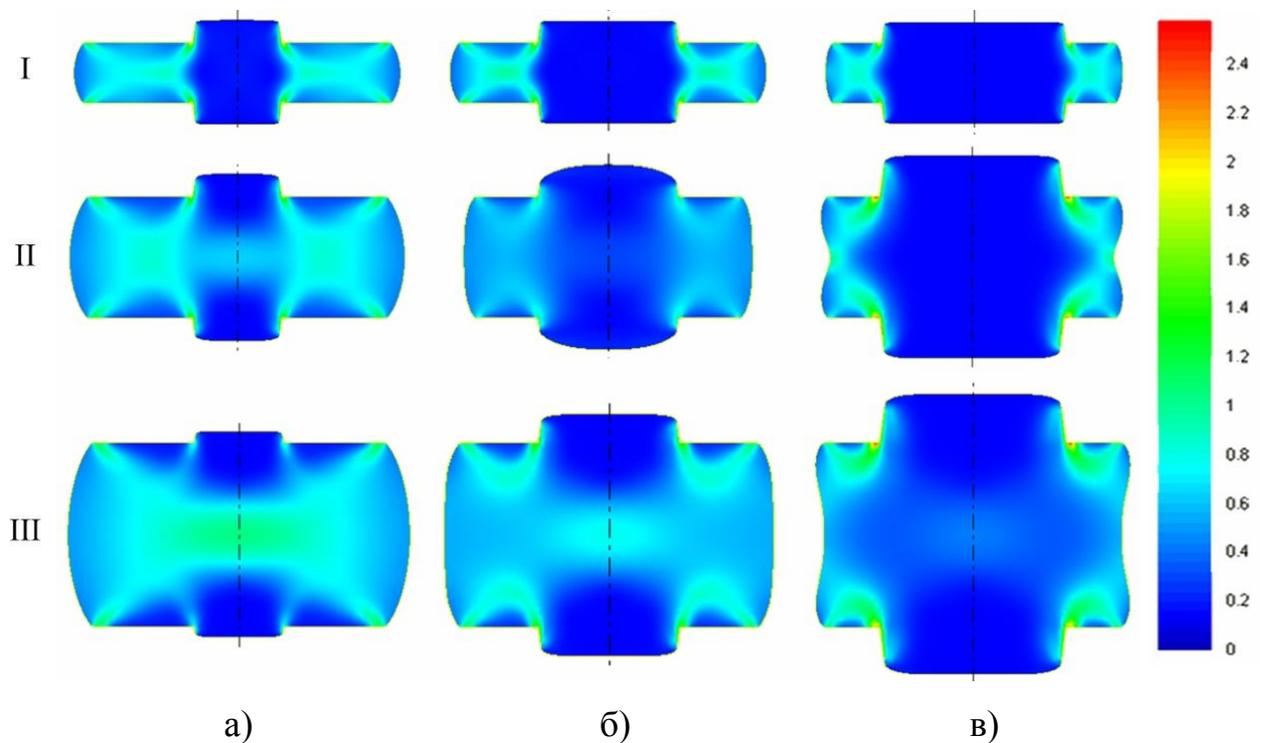


Рисунок 4.5 – Поля деформаций в заготовках, обжатых на 40%.

$D_{отв}/D_0 = 0,35$  (а),  $0,55$  (б) и  $0,72$  (в);  $H_0/D_0 = 0,4$  – I,  $0,8$  – II,  $1,2$  – III

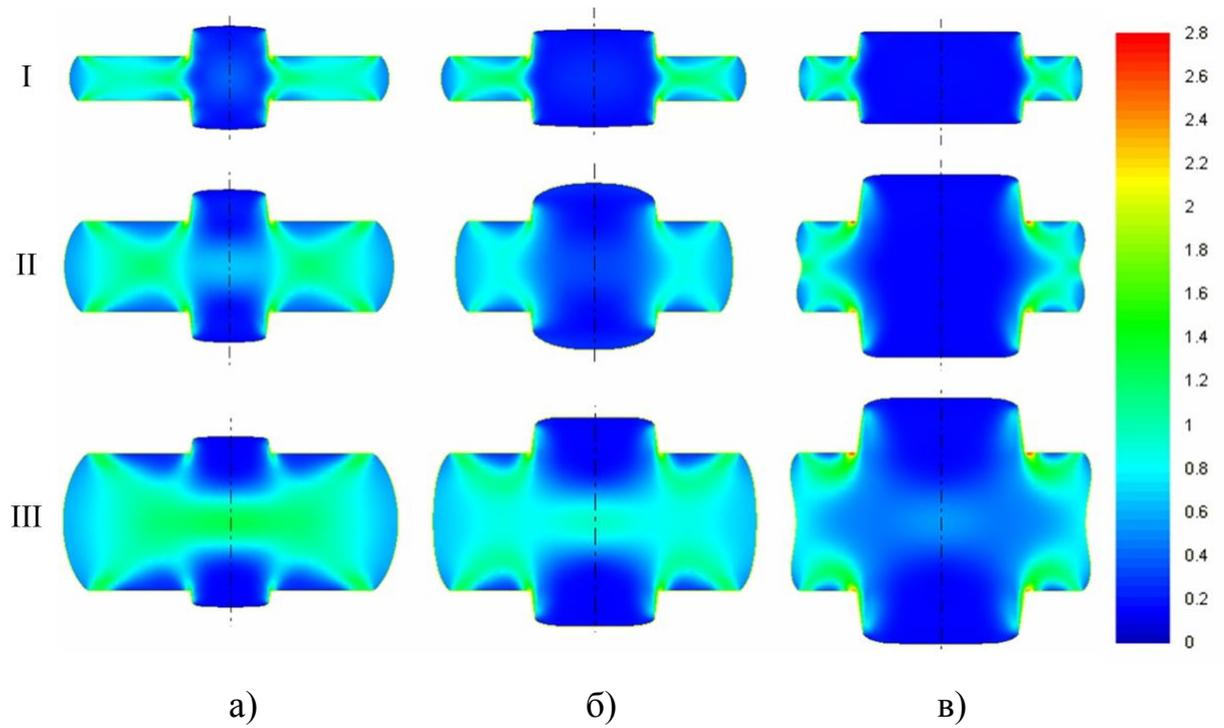


Рисунок 4.6 – Поля деформаций в заготовках, обжатых на 50%.

$D_{\text{отв}}/D_0 = 0,35$  (а),  $0,55$  (б) и  $0,72$  (в);  $H_0/D_0 = 0,4$  – I,  $0,8$  – II,  $1,2$  – III

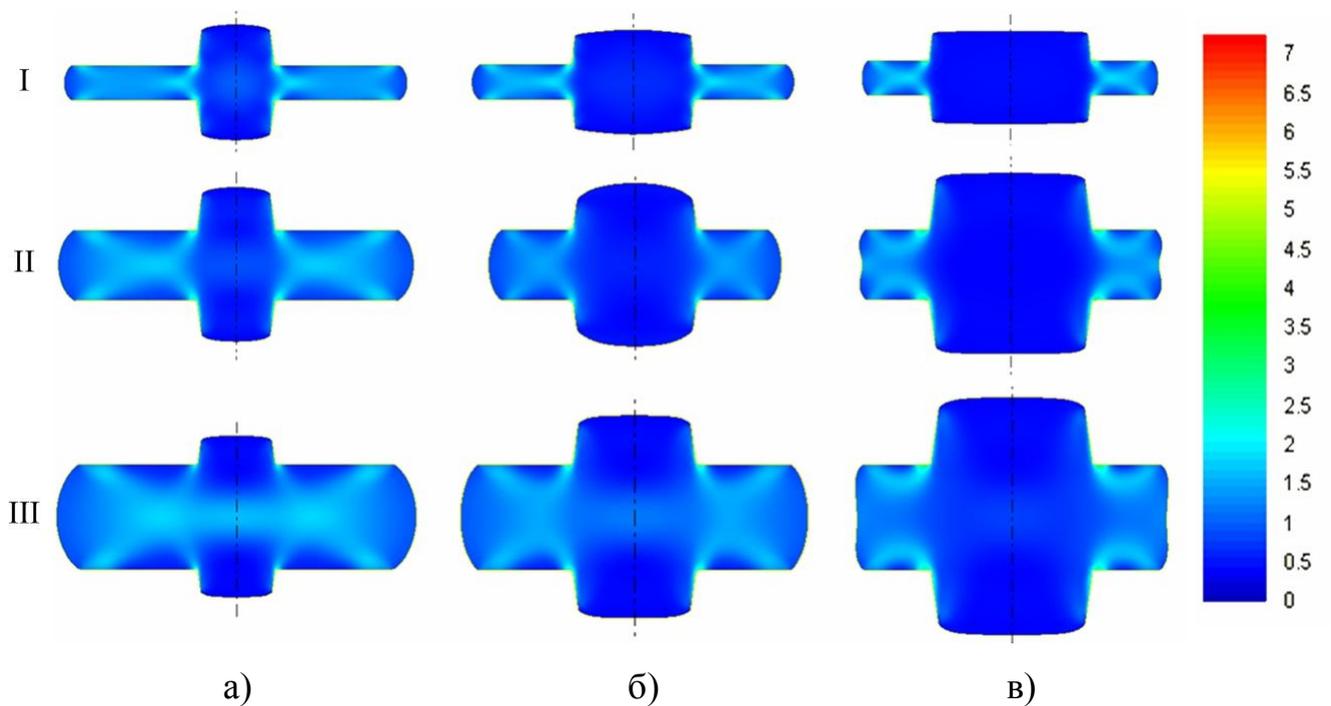


Рисунок 4.7 – Поля деформаций в заготовках, обжатых на 60%.

$D_{\text{отв}}/D_0 = 0,35$  (а),  $0,55$  (б) и  $0,72$  (в);  $H_0/D_0 = 0,4$  – I,  $0,8$  – II,  $1,2$  – III

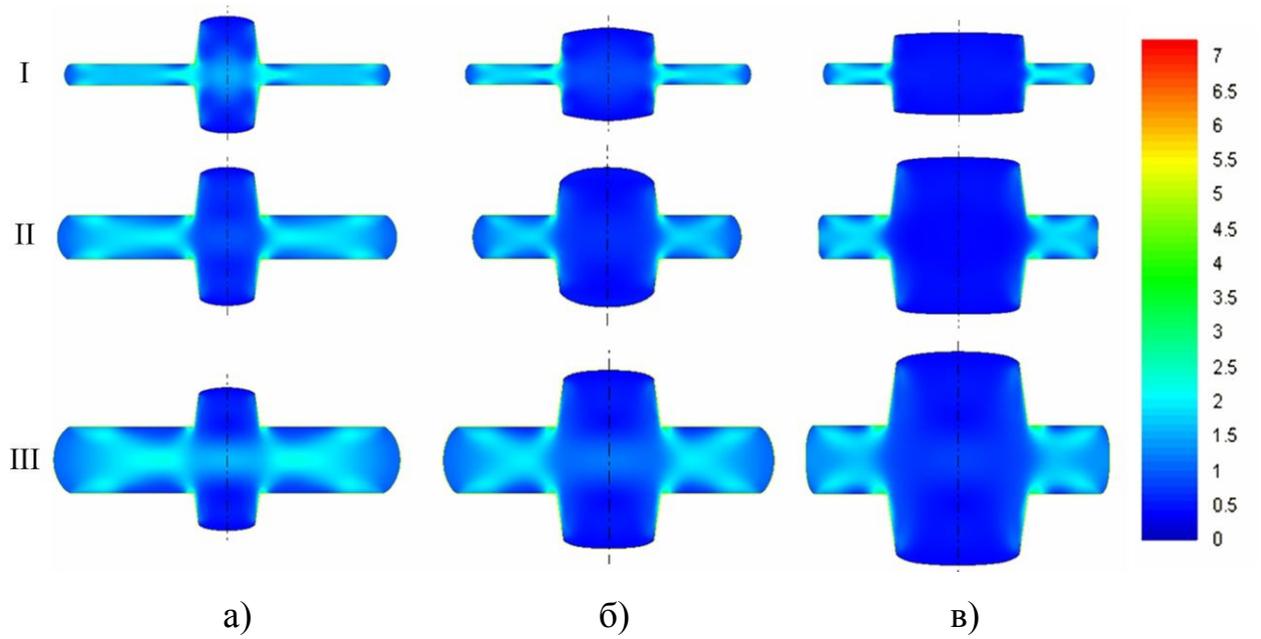


Рисунок 4.8 – Поля деформаций в заготовках, обжатых на 70%.

$D_{отв}/D_0 = 0,35$  (а),  $0,55$  (б) и  $0,72$  (в);  $H_0/D_0 = 0,4$  – I,  $0,8$  – II,  $1,2$  – III

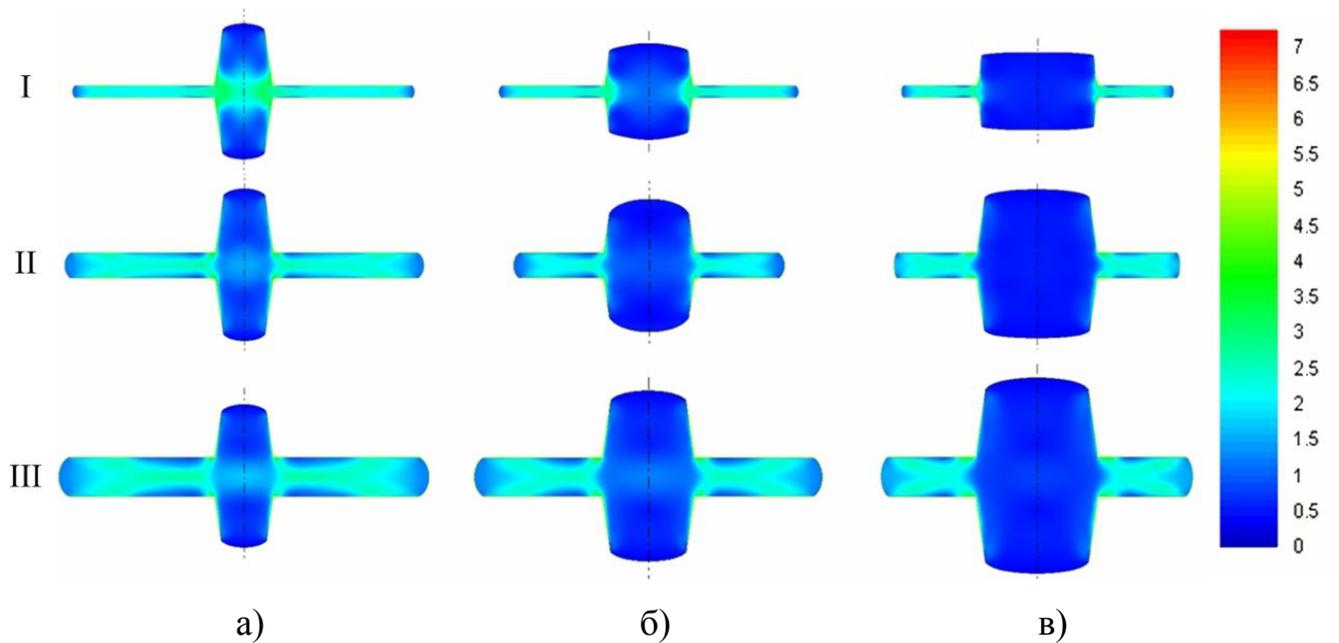


Рисунок 4.9 – Поля деформаций в заготовках, обжатых на 80%.

$D_{отв}/D_0 = 0,35$  (а),  $0,55$  (б) и  $0,72$  (в);  $H_0/D_0 = 0,4$  – I,  $0,8$  – II,  $1,2$  – III

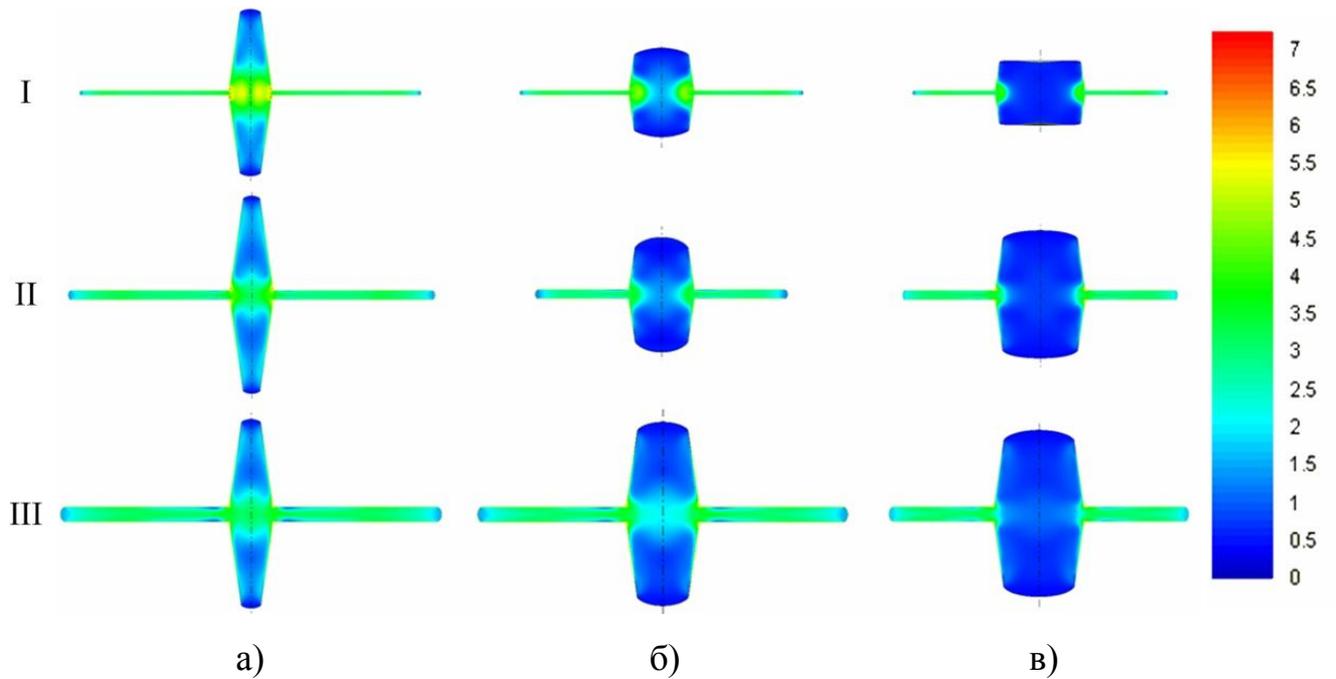


Рисунок 4.10 – Поля деформаций в заготовках, обжатых на 90%.

$D_{\text{отв}}/D_0 = 0,35$  (а),  $0,55$  (б) и  $0,72$  (в);  $H_0/D_0 = 0,4$  – I,  $0,8$  – II,  $1,2$  – III

Конфигурации очага деформаций в заготовке, обжатой на 30%, 60% и 70% (рисунок 4.4, II, а-в, рисунок 4.7, II, а-в, рисунок 4.8, II, а-в) сравнили с показанными на рисунке 4.1. Они хорошо коррелируются как по границам, так и по зонам. Таким образом, метод конечных элементов также можно применить для решения производственного применения обжатия заготовки бойками с осевым отверстием.

## 4.2 Изображения очага деформаций

За многолетнюю историю изучения процесса осадки заготовок бойками с осевым отверстием предлагались различные варианты конфигураций очага деформации, полученные на основании теоретических расчетов и экспериментальных данных. Все конфигурации очага деформации, приведенные ранее, характеризуются наличием потоков, действующих в различных направлениях и границами раздела потоков.

Для различных сочетаний технологических параметров (соотношение геометрических размеров заготовки, относительный диаметр отверстия в инструменте, степень обжатия) наилучшие результаты дают различные из рассмотренных методик исследования, а наибольшей наглядностью отличаются изображения, составленные из сочетаний полученных результатов. На рисунке 4.11 видны преимущества каждой из четырех примененных методик.

Результаты, полученные методом конечных элементов (рисунок 4.11, а), обладают хорошей наглядностью и при дополнительной обработке могут дать количественные данные о распределении деформаций. По рисунку 4.11, а) можно определить размеры и положение зон деформации, а также границ между ними.

Для определения границ зон деформации – границ между жёсткими и пластическими областями заготовки – наиболее подходящим методом является метод полей линий скольжения. Применяя данный метод, определили условные границы очага деформаций как между жесткими и пластическими зонами (рисунок 4.11, б).

На поверхности разъема образца без координатной сетки можно выявить конфигурацию и границы зон деформации по «выдавленным» макрозернам свинца (рисунок 4.11, в).

По изображению очага деформаций, полученного методом координатных сеток (рисунок 4.11, г) можно определить локальные деформации по двум направлениям, рассчитать третью компоненту, а также построить траектории перемещения узлов сетки.

В результате расчета локальных деформаций по сетке (рисунок 4.11, д) построили изолиний локальных деформаций и проанализировали плотность расположения («густоту») линий, получив более детальную количественную информацию об очаге.

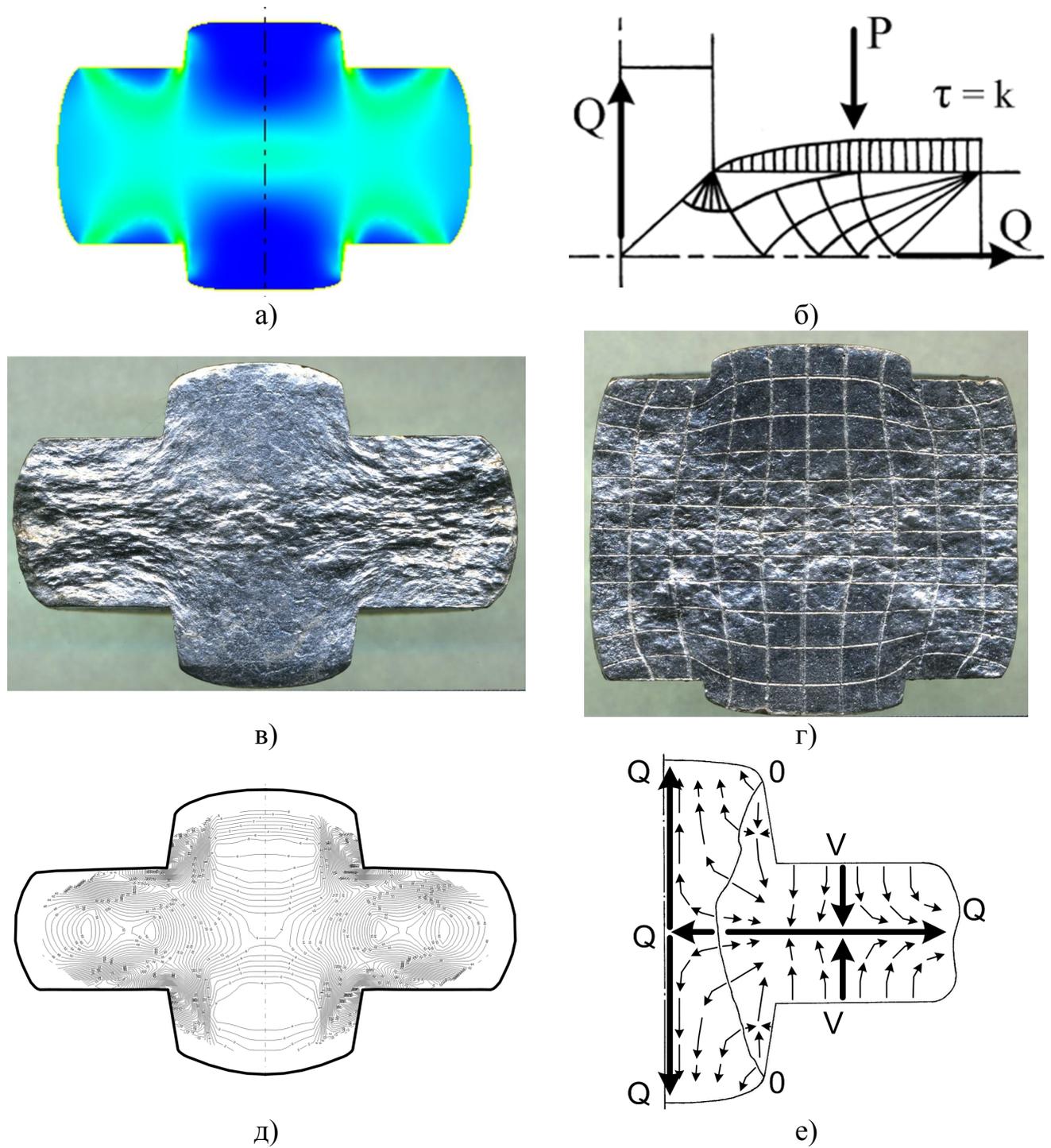


Рисунок 4.11 – Сочетание результатов, полученных различными методиками

Совместное рассмотрение результатов, полученных различными методами, позволило определить местоположение и протяженность границ раздела пластических потоков, направление потоков пластического течения и деформационных перемещений, зоны деформации и границы между ними, распределение локальных деформаций по сечению заготовки, и представить потокораспределение при обжатии заготовки бойками с осевым отверстием (рисунок 4.11, е).

Экспериментальные методы слоистых заготовок и координатных сеток дали исчерпывающую количественную информацию о течении металла и распределении местных деформаций, необходимую для прогнозирования структуры металла, а графо-аналитический метод полей линий скольжения и расчетный метод конечных элементов целесообразно применить в качестве расчетных для определения геометрических параметров в системе «инструмент-заготовка» для построения технологий обжатия заготовок бойками с осевым отверстием.

## Глава 5 Практическое применение результатов исследований

### 5.1 Результаты исследования, имеющие признак практической применимости

#### 5.1.1 Возможность уменьшения потерь металла при механической обработке поковок

При производстве сложнопрофильных дисков с цапфами потери металла могут достигать 70%. Одним из путей уменьшения потерь металла является приближение формы заготовки к форме изделия. В частности, применение осадки бойками с осевым отверстием позволяет получать заготовки с предварительно сформированными цапфами и полотном диска заданных размеров.

#### 5.1.2 Возможность повышения уровня механических свойств металла поковок

В работе [70] описано применение осадки бойками с осевым отверстием. Однако цапфы на дисках получаются небольшой высоты. В той же работе указано, что для повышения уровня механических свойств металла дисков необходима операция «всестороннейковки».

По мнению соискателя, задачу воздействия на механические свойства металла, применяя бойки с осевым отверстием можно решить в двух аспектах – путем повышения уровня местных деформаций в наиболее нагруженных участках диска – т.е. в полотне, и исключить или уменьшить вероятность «выпадов» механических свойств путем уменьшения неоднородности поля деформаций. Основанием для этого являются результаты исследования полей местных деформаций, изложенные в разделах 2.2.4.3 и 2.2.5.2. Таким образом, появляется возможность обойтись без операций «всестороннейковки».

### 5.1.3 Организация встречных потоков металла в направлении «к оси» заготовки

При осадке бойками с осевым отверстием течение металла происходит не только в отверстия бойков, но и к оси заготовки, в радиальном направлении (рисунок 5.1).

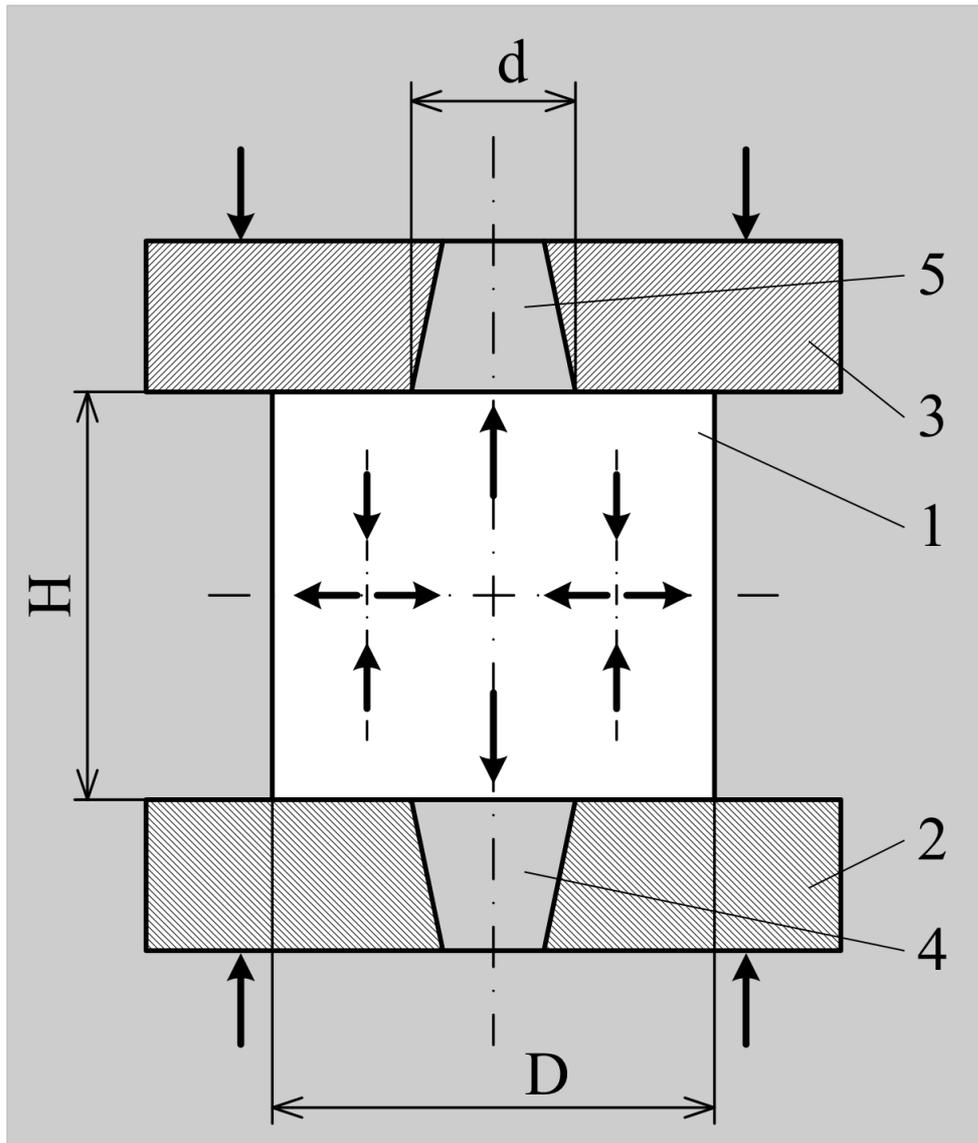


Рисунок 5.1 – Схема поточераспределения при осадке цилиндрической заготовки (1) плоскими бойками (2, 3) с осевым отверстием (4, 5) для получения диска с двумя цапфами:  $H$  – высота,  $D$  – диаметр заготовки и  $d$  – диаметр отверстия в бойке

Встречные потоки в направлении к оси заготовки могут оказаться весьма полезными для воздействия на осевую усадочную полость в слитках и заготовках.

## 5.2 Осевая усадочная полость (ОУП)

ОУП появляется в удлиненных слитках с соотношением длины к диаметру 4-5 и более, из которых получают несколько заготовок; количество заготовок из одного слитка может быть 6-7 и более.

В практике машиностроительных заводов, имеющих собственное металлургическое производство, а также металлургических заводов, выпускающих слитки и заготовки из них для машиностроительного передела, встречаются случаи появления ОУП, которая может располагаться как на части длины слитка – в подприбыльной, средней и донной частях, так и по всей длине.

### 5.2.1 Зарубежные данные теоретических исследований

Наиболее близка к предмету диссертационного исследования работа [71], в которой рассмотрено поведение ОУП при осадке плоскими сплошными плитами (рисунок 5.2).

Авторы указанной статьи считают, по результатам моделирования, осадку эффективным средством для закрытия ОУП. Однако, с доводами авторов статьи согласиться нельзя. Такая усадочная полость при осадке высокой заготовки раскрывается, а не закрывается.

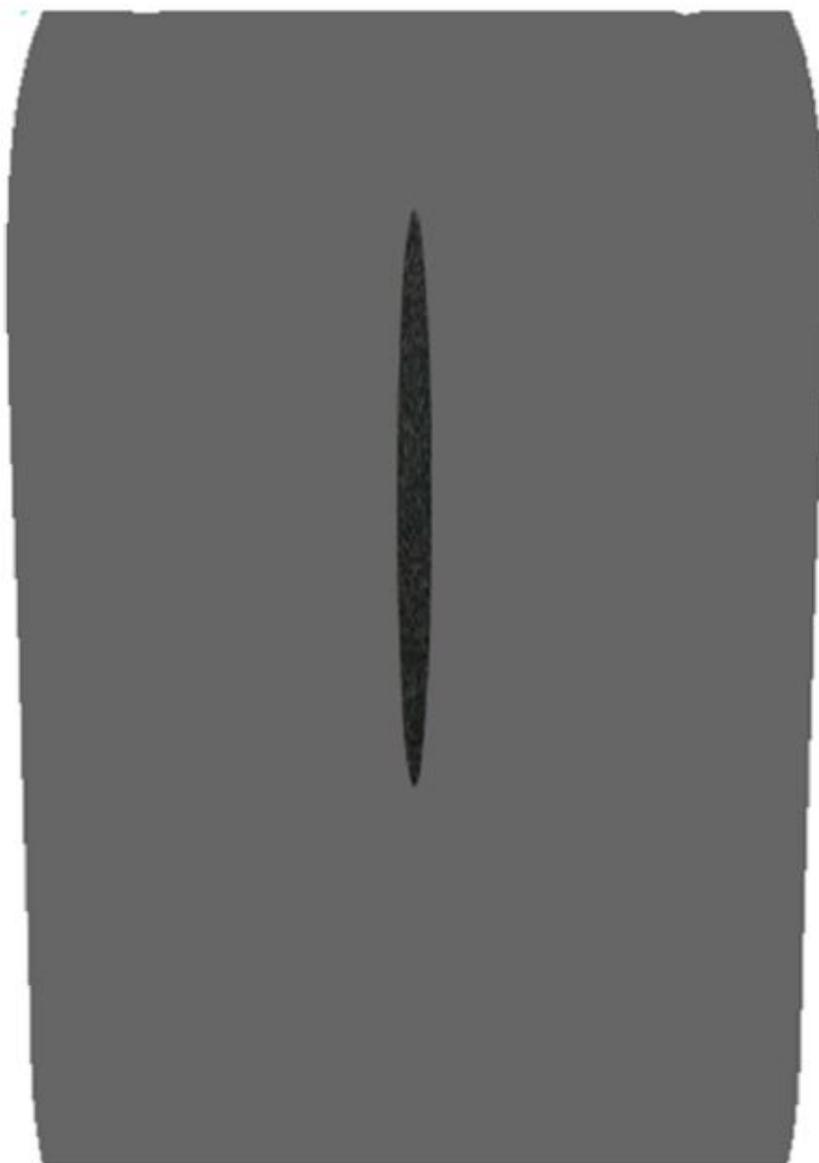


Рисунок 5.2 – Изображение осевой полости при осадке

### 5.2.2 Опыт отечественных исследований

Поскольку удлиненные слитки не осаживают, а куют только протяжкой или разрезают на мерные заготовки, которые потом осаживают индивидуально, то деформационное воздействие на ОУП осуществляют при протяжке путём особых приёмов. Если слиток не протягивают, то после отрезки мерных заготовок осматривают их торцы и, при обнаружении полости, отбраковывают. Так

поступают на Выксунском металлургическом заводе (ВМЗ) и Нижнетагильском металлургическом комбинате (НМК) при производстве железнодорожных колёс [72]. Непрошедшие контроль заготовки отправляют на переплавку.

Практикаковки слитков из стали ЭИ 481 на Горьковском машиностроительном заводе в 1968 году [73] показала, что деформационное воздействие на осевую усадочную полость заключается в закрытии и последующей заварке полости.

При осадке бойками с осевым отверстием в зоне цапф и под ними располагается нейтральные поверхности – поверхности раздела пластических потоков. В сторону к оси заготовки от этой поверхности действуют встречные потоки вытеснения, вызывающие закрытие осевой усадочной полости с последующим завариванием её и выдавливанием в цапфы. По оценке Технического директора ПАО «Русполимет» эти результаты заслуживают внимания и практически ценны при производстве кольцевых заготовок (см. Приложение А).

### 5.3 Разработка и изготовление бойков для проработки литой структуры

Для улучшения деформационной проработки металла по объему заготовки был предложен новый инструмент с коническими участками на рабочей поверхности (рисунок 5.3).

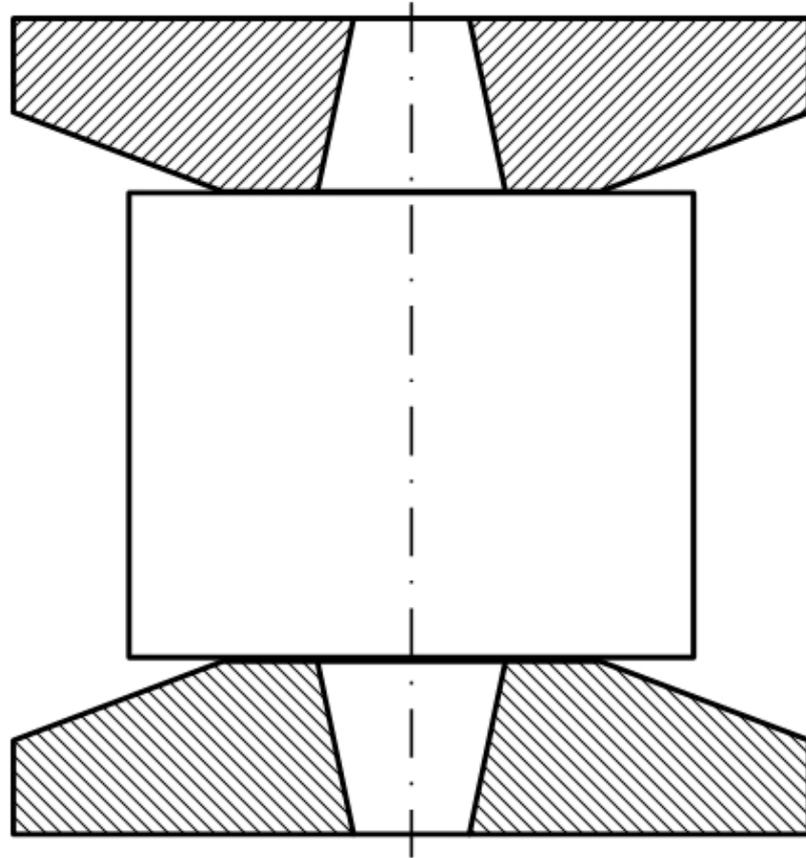


Рисунок 5.3 – Схема осадки заготовок специальными бойками с коническими участками на рабочих поверхностях

Инструмент по рисунку 5.3 был изготовлен диссертантом из стали 5ХНВ и показан на рисунке 5.4. Таким образом, результаты диссертационной работы можно применить при горячей деформации.

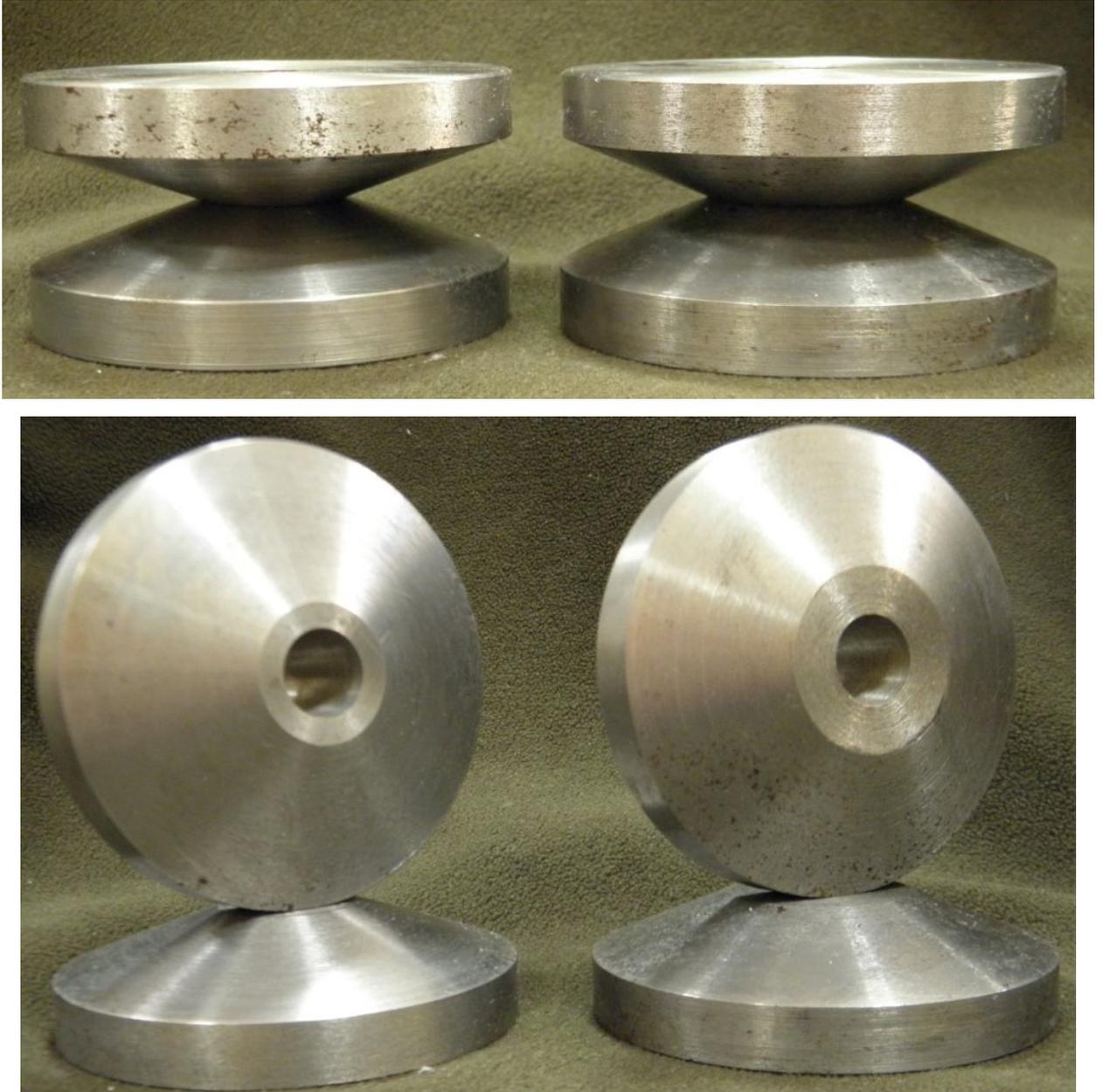


Рисунок 5.4 – Фотографии конических бойков с отверстием

В каждой паре бойков конические участки выполнили с двумя различными углами для возможности изменения деформационного воздействия – увеличения потока в радиальном направлении.

#### 5.4 Патентная защита технических решений

Диссертант изучил и проанализировал технические решения, содержащиеся в фондах Роспатента с 1971 по 2017 годы. Всего 217 патентов по 5 странам. Предложения диссертанта были оформлены в виде заявки на изобретение, по которой получен государственный охранный документ – патент RU 2412018, см. Приложение Б.

#### 5.5 Использование результатов диссертационного исследования в лабораторном практикуме ОМД

Результаты диссертационной работы применяют в лаборатории кафедры «Обработки металлов давлением» с 2006 года в трех студенческих группах, как для дневного, так и вечернего обучения.

Вся оснастка (бойки, направляющий контейнер из прозрачного материала) была разработана, спроектирована и изготовлена лично диссертантом.

Таким образом, результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс в течение многих лет и в достаточно большом объеме (см. Приложение В).

## Заключение

## Итоги выполненного исследования

1. Доказана адекватность моделирования процесса течения заготовок из пластилина: формоизменение, характер полей местных деформаций и их числовые значения совпадают с полученными на заготовках из свинца.

2. На основе исследования пластических потоков установлены границы их раздела и положение нейтральных линий.

В начале обжатия заготовки бойками с отверстием  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,35$  на 13% они расположены под отверстиями бойков, на расстоянии примерно равном высоте цапфы. При обжатии на 60% и более линии переходят в цапфы.

С увеличением диаметра отверстия до 0,55 нейтральные линии располагаются под отверстиями бойков и проходят через всю заготовку для всех стадий обжатия.

При дальнейшем увеличении диаметра отверстия нейтральные линии переходят в полотно диска в начале обжатия, а затем возвращаются в область заготовки между цапфами.

3. При осадке бойками с осевым отверстием высота заготовки может как увеличиваться, так уменьшаться и не изменяться. В работе установлены границы этого явления: при  $H_0/D_0 = 0,8$  высота заготовки не изменяется для всех исследованных величин обжатий и величин отверстий.

4. На полях деформаций отмечены области рассредоточения линий уровня, которые являются границами куполообразных зон затрудненной деформации под верхним и нижним бойками.

5. По построенным траекториям перемещения узлов координатной сетки для исследованных соотношений размеров заготовок установлено, что:

- при обжатии бойками с отверстиями  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,35$  и 0,55 радиальная составляющая перемещений узлов координатной сетки направлена в сторону

свободной боковой поверхности, и увеличивается к горизонтальной плоскости симметрии;

- при увеличении отверстия до  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,72$  радиальная составляющая перемещений точек, расположенных в полоте диска, направлена в сторону свободной боковой поверхности и увеличивается к горизонтальной плоскости симметрии, а под цапфой направлена к оси и уменьшается к горизонтальной плоскости симметрии заготовки.

6. Характер координатных сеток хорошо подтверждает вывод о том, что для всех исследованных соотношений геометрических размеров в системе «инструмент-заготовка» и для всех исследованных степеней обжатия вблизи отверстия образуется зона затрудненной деформации.

7. Максимальное затекание заготовки в отверстие инструмента происходит при соотношении  $H_0/D_0 = 0,4$ , величине отверстия  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,35$  при степени обжатия  $\varepsilon_{0H} = 0,7$ .

8. Нейтральные линии являются линиями раздела макропотоков: предписанное течение – двухпоточное со стыком потоков, а вытеснение происходит только в одну сторону от нейтральной линии. Однако от одной линии могут получаться два потока разного характера.

9. Конфигурации очагов деформаций, полученных графо-аналитическими построениями и методом конечных элементов хорошо коррелируются.

10. Способ получения поковок типа дисков при осадке бойками с осевым отверстием защищен патентом на изобретение.

11. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс с 2006 года и применяются в настоящее время.

12. По заключению ПАО «Русполимет» результаты диссертационной работы заслуживают внимания и промышленно применимы.

## Рекомендации

Продолжить использование в учебном процессе результатов диссертационной работы.

## Перспективы дальнейшей разработки темы

Распространить практическое применение полученных в диссертационной работе результатов и перенести их в промышленность.

## Список литературы

1. Охрименко, Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства / Я. М. Охрименко. – М.: Машиностроение, 1976. – 560 с.
2. Кобелев, О. А. Ковка широких толстых плит / О. А. Кобелев, М. А. Цепин, М. М. Скрипаленко. – М.: Теплотехник, 2009. – 192 с.
3. Гузенков, П. Г. Детали машин / П. Г. Гузенков. – М.: Высшая школа, 1986. – 356 с.
4. ГОСТ 9036-88. Колеса цельнокатаные. Конструкция и размеры. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 15 с.
5. ГОСТ 10791-2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2011. – 27 с.
6. Гребенюк, Г. С. Исследование поковок из слитков, отлитых сверху и сифоном / Г. С. Гребенюк, Р. А. Меркер, В. П. Михеев, Б. Е. Михайленко, В. А. Бойко, В. В. Шкиль // Кузнечно-штамповочное производство. – 1973. – № 5. – С. 8–10.
7. Игнем, Т. Т. Моделирование процесса образования различных типов неметаллических включений при затвердевании низкоуглеродистых сталей / Т. Т. Игнем, А. В. Дуб, А. Ф. Вишкарев, М. Белахуэль // Известия вузов. Черная металлургия. – 1996. – № 11. – С. 17–20.
8. Жульев, С. И. Дугообразные трещины в крупном кузнечном слитке / С. И. Жульев, Г. П. Шевкун, В. Ф. Петрова, Н. С. Масловская // Известия вузов. Черная металлургия. – 2006. – № 11. – С. 30–34.
9. Ефимов, В. А. Стальной слиток / В. А. Ефимов. – М.: Металлургиздат, 1961. – 357 с.
10. Дальский, А. М. Технология конструкционных материалов / А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 511 с.
11. Смоленский, А. Н. Конструкция и расчет деталей паровых турбин / А. Н. Смоленский. – М.: Машиностроение, 1964. – 467 с.

12. Вьюнов, С. А. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей / С. А. Вьюнов, Ю. И. Гусев, А. В. Карпов. – М.: Машиностроение, 1989. – 565 с.
13. G. Stevenot. La duree de service des roues ferroviaires / G. Stevenot, F. Demilly // *Revue Générale des Chemins de Fer.* – 2002. – № 5. – P. 33 – 39.
14. Срок службы железнодорожных колес // *Железные дороги мира.* – 2003. – № 7. – С. 47–52
15. Генерсон, И. Г. Поковки из специальных сталей / И. Г. Генерсон. – Л.: Машиностроение, 1967. – 311 с.
16. Лозицкий, Л. П. Авиационные двухконтурные двигатели Д30-КУ и Д30-КП (конструкция, надежность и опыт эксплуатации) / Л. П. Лозицкий, М. Д. Авдошко, В. Ф. Березлев. – М.: Машиностроение, 1988. – 228 с.
17. Розенберг, С. Ш. Исследование мощных паровых турбин на электростанциях / С. Ш. Розенберг, Л. П. Сафонов, Л. А. Хоменок. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 272 с.
18. Белькинд, Л. Д. История энергетической техники / Л. Д. Белькинд, О. Н. Веселовский, И. Я. Конфедератов, Я. А. Шнейберг. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 664 с.
19. ГОСТ 11018-2011. Колесные пары тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2012. – 26 с.
20. Смирнов, О. М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности / О. М. Смирнов. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.
21. Ковка и штамповка: Справочник: в 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка / под общ. ред. Е. И. Семенова. – М.: Машиностроение, 1986. – 592 с.
22. Алтыкис, А. В. Определение усилия деформирования при секционной штамповке деталей типа дисков / А. В. Алтыкис // *Кузнечно-штамповочное производство.* – 1959. – №5.

23. Прозоров, Л. В. О возможности применения секционной штамповки для изготовления железнодорожных колес / Л. В. Прозоров, А. В. Алтыкис // Кузнечно-штамповочное производство. – 1966. – № 5 С. 42–43.
24. Филимонов, Ю. Ф. Гидростатическая штамповка дисковых заготовок / Ю. Ф. Филимонов, В. И. Гусинский // Кузнечно-штамповочное производство. – 1973. – № 12. – С. 11–13.
25. Никонов, Е. В. Штамповка жаропрочных сплавов на установке изотермического деформирования / Е. В. Никонов, Е. И. Разуваев // Сталь. – 2000. – № 3 С. 77–78.
26. Протопопова, Т. И. Некоторые особенности двусторонней горячей штамповки / Т. И. Протопопова // Кузнечно-штамповочное производство. – 1966. – № 10. – С. 13–18.
27. Данилов, В. В. Ротационные методы деформирования и их применение в металлообработке / В. В. Данилов, Н. Л. Лисунец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2003. – № 1. – С. 35–40.
28. Bewlay, B. P. Net-shape manufacturing of aircraft engine disks by roll forming and hot die forging / B. P. Bewlay, M. F. X. Gigliotti, C. U. Hardwicke, O. A. Kaibyshev, F. Z. Utyashev, G. A. Salischev // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – 135. – P. 324–329.
29. Шифрин, М. Ю. Производство цельнокатаных колес и бандажей / М. Ю. Шифрин, М. Я. Соломович. – М.: Металлургиздат, 1954. – 501 с.
30. Кузовков, А. Я. Производство железнодорожных колес из непрерывнолитой заготовки на Нижнетагильском меткомбинате / А. Я. Кузовков, А. А. Федоров, Л. В. Минаева, В. Д. Егоров // Известия вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 7 С. 24–26.
31. Петренко, Ю. П. Освоение производства цельнокатаных колес для высокоскоростных электровозов / Ю. П. Петренко, А. М. Шегусов, В. Д. Шестак, Э. Н. Никольская, И. М. Петракова // Сталь. – 2000. – № 5. – С. 42–43.

32. Кушнарeв, А. В. Новый способ и рациональные режимы прокатки колес / А. В. Кушнарeв, А. А. Васильев, В. Д. Шестак, А. А. Богатов // Сталь. – 2010. – № 5. – С. 83–85.
33. Кушнарeв, А. В. Исследование формoизменения и сопротивления деформации металла при производстве колесной заготовки / А. В. Кушнарeв, Г. П. Перунов, А. А. Киричков, М. И. Журухин, Ю. В. Инатович // Сталь. – 2010. – № 5. – С. 86–88.
34. Zeiler, G. Experiences in manufacturing of forgings for power generation application / G. Zeiler, R. Bauer, A. Putschoegl // La Metallurgia Italiana. – 2010. – N. 6. – P. 33–40.
35. Тюрин, В. А. Некоторые методы управления качеством металла крупных поковок. / В. А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. 1977. – № 11. – С. 35–39.
36. Ковка крупных поковок / вед. ред. Э. Л. Колосов. – Свердловск: Metallургиздат, 1962. – 224 с.
37. Тюрин, В. А. Теория и процессыковки слитков на прeссах / В. А. Тюрин. – М.: Машиностроение, 1979. – 240 с.
38. Гофмейстер, Г. Кузнечные штампы. Изготовление и применение: [пер. с нем.] / Г. Гофмейстер. – М.: Госмашметиздат, 1932. – 80 с.
39. Шарапин, Е. Ф. Ковка в подкладных кольцах / Е. Ф. Шарапин // Вестник металлопромышленности. – 1938. – № 4.
40. Камнев, П. В. Совершенствованиековки крупных поковок / П. В. Камнев. – Л.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
41. Лошкарев, В. Ф. Производство стальных поковок / В. Ф. Лошкарев. – М.: Metallургиздат, 1953. – 300 с.
42. Бойцов, В. В. Горячая штамповка / В. В. Бойцов, И. Д. Трофимов. М.: Высшая школа, 1978. – 304 с.
43. Тарновский, И. Я. Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчета усилий и деформаций) / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев,

- О. А. Ганаго, В. Л. Колмогоров, В. Н. Трубин, Р. А. Вайсбурд, В. И. Тарновский. – М.: Металлургиздат, 1963. – 672 с.
44. Семенов, Е. И. Ковка и горячая штамповка / Е. И. Семенов. – М.: МГИУ, 2011. – 411 с.
45. Генерсон, И. Г. Новая технология производства поковок крупных турбинных дисков / И. Г. Генерсон, П. Д. Хинский, В. Н. Токарев, П. М. Либман, В. Н. Крылов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1973. – № 1. – С. 3–7.
46. Токарев, В. Н. Усовершенствование технологического процессаковки турбинных дисков / В. Н. Токарев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1973. – № 3. – С. 41–43.
47. Кордюков, В. П. Опыт изготовления крупных поковок свободной ковкой / В. П. Кордюков. – М.: Машиностроение, 1965. – 192 с.
48. YoungDeak Kima. Efficient forging process to improve the closing effect of the inner void on an ultra-large ingot / YoungDeak Kima, JongRae Chob, WonByung Baec // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – 211. – P. 1005–1013.
49. Ребельский, А. В. Основы проектирования процессов горячей объемной штамповки / А. В. Ребельский. – М.: Машиностроение, 1965. – 248 с.
50. Шофман, Л. А. Основы расчета процессов штамповки и прессования / Л. А. Шофман. – М.: Машгиз, 1961. – 340 с.
51. Брюханов, А. Н. Ковка и объемная штамповка / А. Н. Брюханов. – М.: Машиностроение, 1975. – 408 с.
52. Тарновский, И. Я. Теория обработки металлов давлением / Тарновский И. Я., Поздеев А. А., Ганаго О. А. – М.: Металлургиздат, 1963. – 672 с.
53. Тарновский И. Я. Свободная ковка на прессах / И. Я. Тарновский, В. Н. Трубин, М. Г. Златкин. – М.: Машиностроение, 1967 – 328 с.
54. Тюрин, В. А. Теория обработки металлов давлением / В. А. Тюрин, А. И. Мохов. – Волгоград: ВолгГТУ, 2000. – 416 с.
55. Головин, А. Ф. Деформация поковки на подкладных кольцах / А. Ф. Головин // Расчет и конструирование заводского оборудования : сб. науч. тр. / Уральский политехнический институт, Свердловск. – М.: Машгиз, 1950.

56. Смирнов-Аляев, Г. А. Механические основы пластической обработки металлов / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1968. – 271 с.
57. Унксов, Е. П. Пластическая деформация при ковке и штамповке / Е. П. Унксов. – М.: Машгиз, 1939. – 191 с.
58. Шарапин, Е. Ф. Элементы теории обработки металлов давлением / Е. Ф. Шарапин. – Харьков: Metallurgizdat, 1961. – 208 с.
59. Lin, S. Y. Influences of the geometrical conditions of die and workpiece on the barreling formation during forging-extrusion process / S. Y. Lin, F. C. Lin // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – 140. – P. 54–58.
60. Тарновский, И. Я. Формоизменение при пластической обработке металлов / И. Я. Тарновский. – М.: Metallurgizdat, 1954. – 534 с.
61. Паршин, В. А. Совершенствование производства и повышение качества крупногабаритных осесимметричных стальных изделий / В. А. Паршин, О. А. Ганаго, М. С. Валетов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1997. – № 12. – С. 32–34.
62. Воронцов, В. К. Экспериментальные методы механики деформируемых твердых тел (технологические задачи обработки давлением) / В. К. Воронцов, П. И. Полухин, В. А. Белевитин, В. В. Бринза. – М.: Metallurgiya, 1990. – 480 с.
63. Охрименко, Я. М. Теория процессовковки / Я. М. Охрименко, В. А. Тюрин. – М.: Высшая школа, 1977. – 294 с.
64. Сафаров, Ю. С. Моделирование процессов пластического формоизменения с использованием поляризационно-оптического метода «замораживания» деформаций / Ю. С. Сафаров // Кузнечно-штамповочное производство. – 1975. – № 2. – С. 3–6.
65. Воронцов, В. К. Методика проведения измерений деформированного состояния образца при ковке по методу ОЧП / В. К. Воронцов, С. А. Машеков, А. В. Котелкин, С. М. Дюсекенов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 9. – С. 19–22.

66. Смирнов-Аляев, Г. А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г. А. Смирнов-Аляев, В. П. Чикидовский. – Л.: Машиностроение, 1972. – 360 с.
67. Перлин, И. Л. Теория прессования металлов / И. Л. Перлин, Л. Х. Райтбарг. – М.: Metallurgy, 1975. – 448 с.
68. Тюрин В. А. Течение металла и износ инструмента при штамповке осесимметричной поковки / В. А. Тюрин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2004. – № 3. – С. 31–34.
69. Рыбин, Ю. И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением / Ю. И. Рыбин, А. И. Рудской, А. М. Золотов. – СПб.: Наука, 2004. – 643 с.
70. Пономаренко, Д. А. Использование специализированных изотермических прессов дляковки заготовок дисков турбины из труднодеформируемых жаропрочных сплавов / Д. А. Пономаренко, М. Н. Летников, А. С. Скугорев, С. А. Сидоров // Кузнечно-штамповочное производство. – 2018. – № 3. – С. 19–25.
71. Harris, N. Development of a fast converging material specific void closure model / N. Harris, D. Shahriari, M. Jahazi // Journal of Manufacturing Processes. – 2017. – 26. – P. 131–141.
72. Способ изготовления железнодорожных колес из непрерывнолитого слитка : пат. 2139768 Рос. Федерация : МПК В 21 Н, 1/04 / Кузовков А. Я., Петренко Ю. П., Шегусов А. М., Хафизуллин И. С., Шестак В. Д., Пилипенко В. Ф., Баранова Е. Г., Ислентьева И. А., Аввакумов С. Б.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Нижнетагильский металлургический комбинат». – № 98106297/02; заявл. 23.03.98 ; опубл. 20.10.99, Бюлл. № 29.
73. Способковки дисков из слитка : а. с. 322228 СССР : МКИ В 21 J 1/04 / Я. М. Охрименко, В. А. Тюрин, Ю. И. Мищенко, В. В. Ляхов, А. С. Кузнецова, Ф. М. Валявкин, Е. С. Пермитин, Ю. В. Шеломаев, А. Е. Задоя, В. В. Акимов, В. А. Покровский (СССР) – № 1425137/25–27 ; заявл. 06.04.1970; опубл. 30.11.71, Бюлл. № 36.



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2412018

**СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКОВОК ТИПА ДИСКОВ**Патентообладатель(ли): *Тюрин Валерий Александрович (RU)*Автор(ы): *Тюрин Валерий Александрович (RU), Овечкин Владимир Викторович (RU), Савонькин Михаил Борисович (RU)*

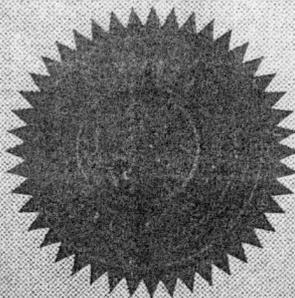
Заявка № 2009126432

Приоритет изобретения 10 июля 2009 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 февраля 2011 г.

Срок действия патента истекает 10 июля 2029 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

## Приложение В



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе  
НИТУ «МИСиС»

В.Л. Петров

2018 г.

## Акт

об использовании в учебном процессе материалов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук старшего преподавателя кафедры Обработки металлов давлением Савонькина Михаила Борисовича

Комиссия в составе: директор института Экотехнологий и инженеринга доцент, к.т.н. А.Я. Травянов, и.о. заведующего кафедрой Обработки металлов давлением доцент, к.т.н. А.С. Алещенко составили настоящий Акт о том, что на кафедре ОМД при подготовке бакалавров и магистров используются результаты теоретических и экспериментальных исследований по формоизменению и потокообразованию в заготовках при различных соотношениях геометрических размеров в системе «инструмент-заготовка», а также деформирующий инструмент и оснастка, изготовленные соискателем.

Указанные материалы используются при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий по курсам «Обработка металлов давлением», «Технологические процессы производства сплошных и полых изделий», при выполнении КНИР, выпускных квалификационных работ студентов бакалавриата и магистратуры.

И.о. заведующего кафедрой  
Обработки металлов давлением  
доцент, к.т.н.

А.С. Алещенко

Директор института  
Экотехнологий и инженеринга  
доцент, к.т.н.

А.Я. Травянов