

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

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Тюрин Валерий Александрович, д.т.н., профессор

Москва – 2018

## Общая характеристика работы

Актуальность темы.

В связи с продолжающимся процессом развития отечественной промышленности, выпускающей изделия ответственного назначения, особое внимание приобретает разработка ресурсосберегающих технологий, экономии дорогостоящих специальных сталей и сплавов и уменьшения трудозатрат на выпуск изделий.

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.

Несмотря на многолетнюю историю, как минимум с 1936 года, процесс осадки бойками с осевым отверстием нельзя отнести к окончательно исследованным. В частности, отсутствуют сведения о конфигурации и границах очага деформации, распределении местных деформаций, 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  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,55$  и в направлении к оси для  $D_{\text{отв}}/D_0 = 0,72$

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  $\epsilon_{0H}$ .

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.

Для исследования распределения местных деформаций, конфигурации очага и зон деформации, формоизменения заготовок применены экспериментальные методы слоистых заготовок и координатных сеток, а также графоаналитический метод полей линий скольжения и конечно-элементная система QForm-2D v.2.2.03; метод макрозерен позволяет прогнозировать структуру металла в поковке.

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 макропоточков 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).

Публикации.

Основное содержание работы отражено в 13 работах, опубликованных в научно-технических изданиях, в том числе в 8-ми, входящих в перечень ВАК для основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Новизна технических решений защищена патентом на изобретение.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, изложена на 137 страницах машинописного текста, включающего 83 рисунка, 2 таблицы, библиографический список из 73 наименований отечественных и зарубежных авторов, 3 приложения.

## Основное содержание работы.

**Во введении** дано обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи, приведены методики исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** изложен аналитический обзор литературы по производству поковок дисков. Рассмотрено назначение и характер силовых условий работы дисков. Проанализированы основные способы производства дисков – объемной штамповкой, литьем, ковкой (включая операции осадки и разгонки), секционным деформированием, двусторонним выдавливанием, ротационной раскаткой. 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.

**Во второй главе** представлены результаты исследования течения металла при осадке бойками с осевым отверстием.

Для исследования формоизменения заготовок применили слоистые пластилиновые образцы (рисунок 1), а также составные цилиндрические свинцовые образцы с нанесенной в плоскости разъема координатной сеткой (рисунок 2). В ходе постадийной осадки измеряли геометрические размеры образцов и строили поля деформаций по изменению толщин слоев (рисунок 3) и ячеек координатной сетки (рисунок 4).

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. На начальных стадиях обжатия нет выраженного характера неравномерного распределения деформаций.

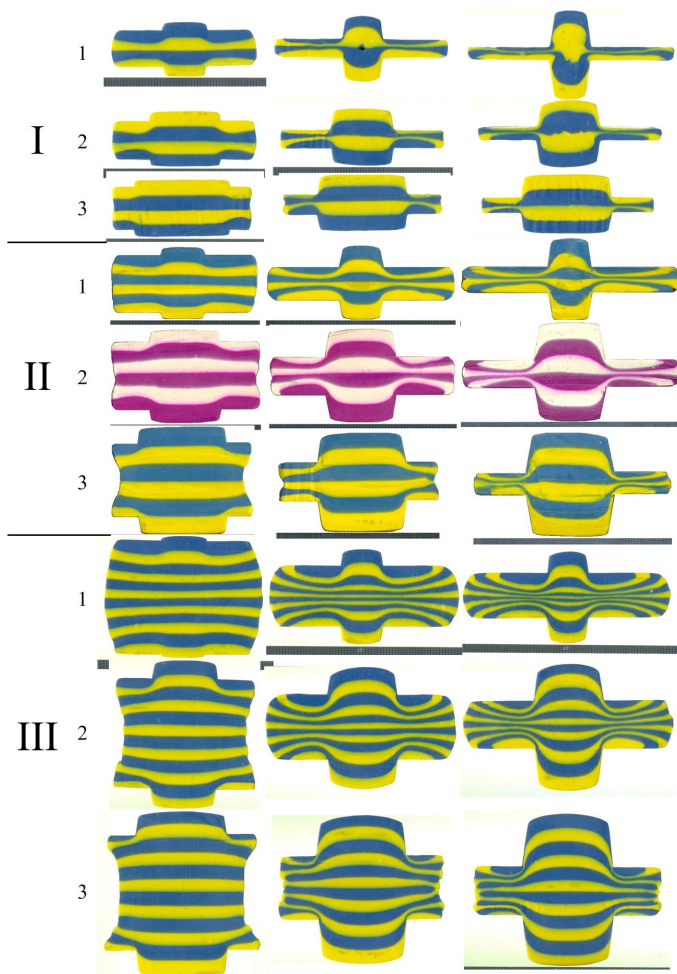


Рисунок 1 – Меридиональные сечения слоистых заготовок, обжатых на 30 (а), 60 (б) и 70 % (в); I –  $H_0/D_0 = 0,4$ , II –  $H_0/D_0 = 0,8$ , III –  $H_0/D_0 = 1,2$ ;  $D_{отв}/D_0$  – 0,35 (1), 0,55 (2), 0,72 (3)

При увеличении обжатия 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.

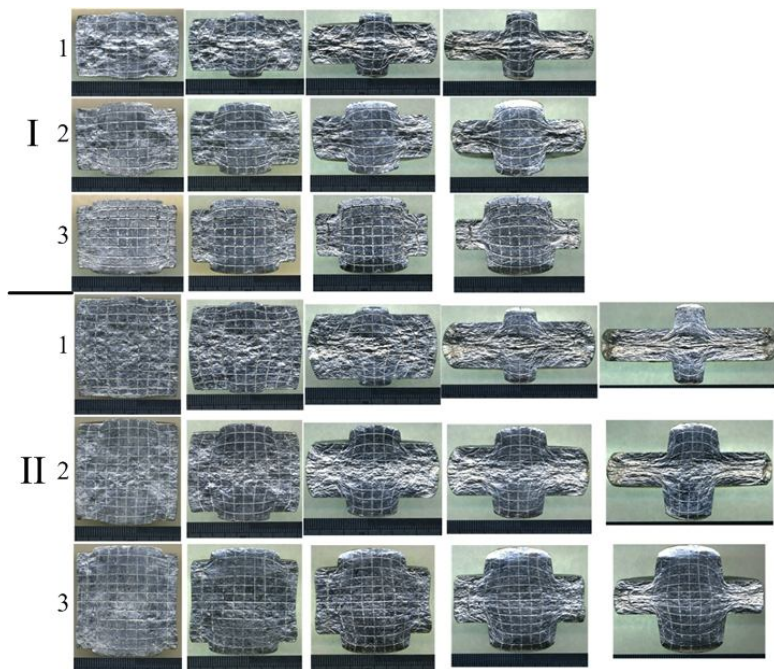


Рисунок 2 – Фотографии координатных сеток. а-д – ступени обжатия;

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

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

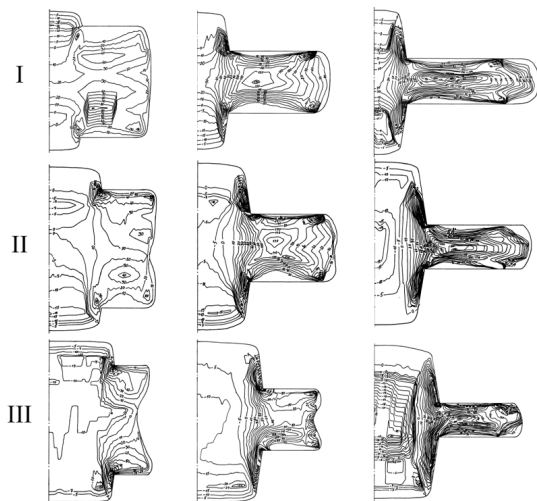


Рисунок 3 – Поля местных главных логарифмических деформаций  $\epsilon_1$  в меридиональных сечениях обжатых заготовок.  $H_0/D_0 = 0,8$ ;  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (I),  $0,55$  (II),  $0,72$  (III);  $\epsilon_{он} = 0,30$  (а),  $0,60$  (б),  $0,70$  (в)

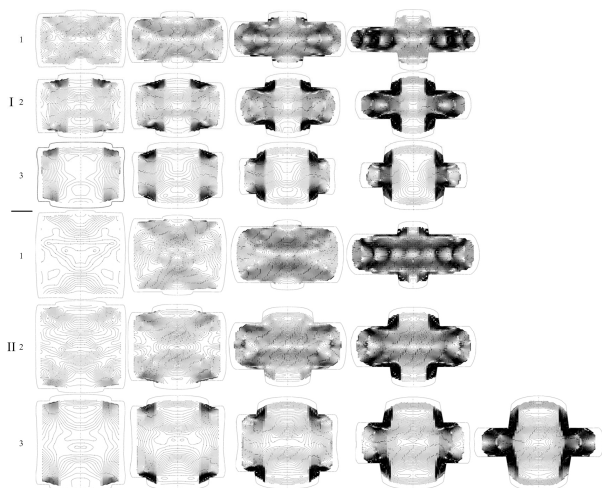


Рисунок 4 – Поля местных логарифмических деформаций  $\epsilon_1$ . а-д – степени обжатия;  $H_0/D_0 = 0,8$  – I, 1,2 – II;  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  – 1,  $0,55$  – 2,  $0,72$  – 3

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 компонент деформаций, построенные по изменению координатных сеток 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.

Информацию о перемещении частиц заготовки дают графики траекторий узлов координатной сетки (рисунок 5), при анализе которых установили:

Длины траекторий перемещения уменьшаются с увеличением соотношения  $D_{\text{отв}}/D_0$  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.

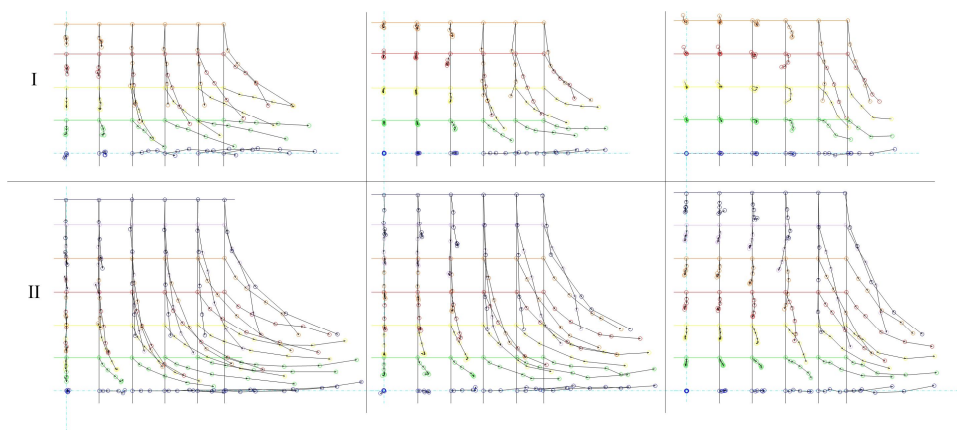


Рисунок 5 – Траектории перемещений узлов координатной сетки.  $H_0/D_0 = 0,8$   
– I, 1,2 – II;  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (а),  $0,55$  (б),  $0,72$  (в)

**В третьей главе** представлены результаты исследования зон деформации, затекания заготовки в отверстия бойков и потокораспределения при осадке бойками с осевым отверстием.

Фотографии поверхностей разъема составных свинцовых образцов без координатной сетки (рисунок 6) позволили выявить зоны деформации в

заготовках. Вблизи отверстия в бойках имеет место «жесткая зона» – зона затрудненной деформации. Это явление сохраняется для всех исследованных соотношений  $D_{отв}/D_0$ ,  $D_0/H_0$  и для всех степеней обжатия.

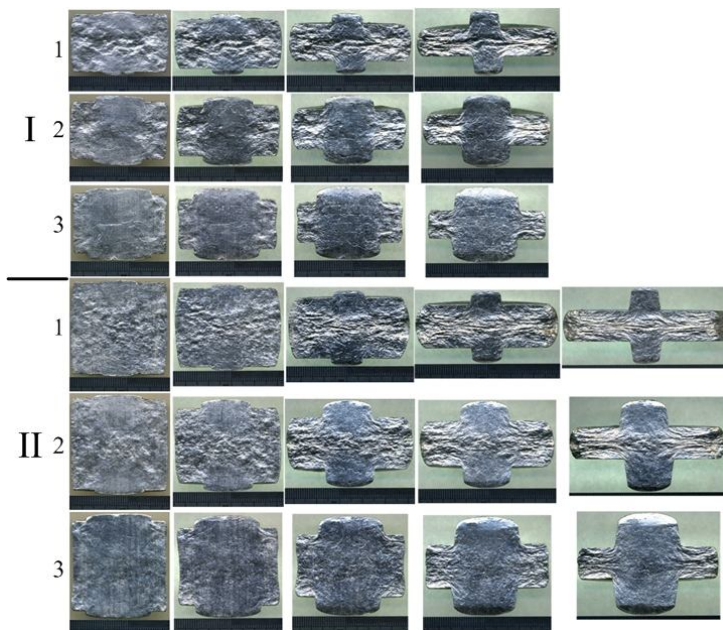


Рисунок 6 – Фотографии зеренной структуры. а-д – ступени обжатия;

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

Для оценки формоизменения заготовки построили графические зависимости (рисунок 7) 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. Анализ представленных графических зависимостей показывает:

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  $\varepsilon_{0H} = 0,7$ .

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.

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

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.

Совместное рассмотрение графических зависимостей 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 1

Таблица 1 – Экстремальные соотношения параметров

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

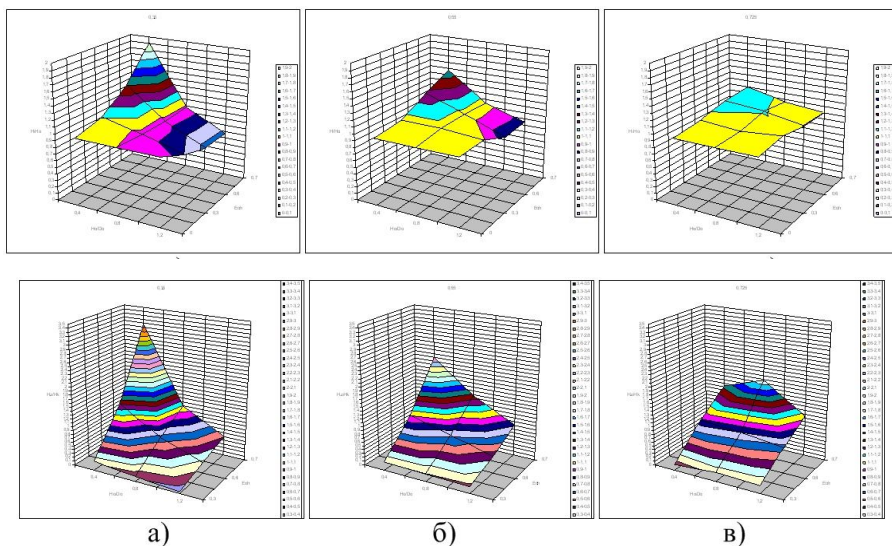


Рисунок 7 – Поверхности изменения относительных размеров  $H/H_0$  (I) и  $H_ц/H_к$  (II) заготовки при осадке в зависимости от соотношений размеров  $H_0/D_0$  и степени обжатия  $\varepsilon_{0H}$  для различных диаметров отверстия  $D_{0TB}/D_0 = 0,35$  (а),  $0,55$  (б),  $0,725$  (в)

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. При обжатии заготовок с соотношением  $H_0/D_0 = 1,2$  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 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, что связано с вытеснением материала заготовки в радиальном направлении под плоскими частями инструмента.

На основании анализа полей деформаций логарифмических и относительных выделены нейтральные линии, соответствующие линиям уровня «0». На основании рассмотрения расположения нейтральных линий можно показать направления макропотоков материала (рисунок 8). 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. Нейтральные линии являются линиями раздела макропотоков. Однако, встречаются два потока разного характера от одной линии.

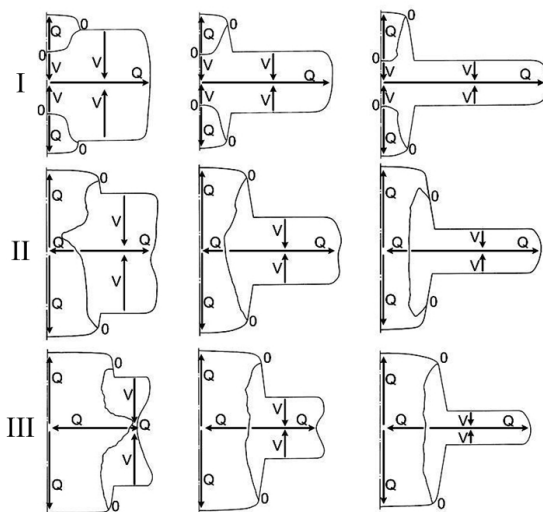


Рисунок 8 – Направления предписанных  $V$  и вытеснения  $Q$  потоков в заготовках.  $D_{отв}/D_0=0,35$  (I),  $0,55$  (II),  $0,72$  (III);  $\epsilon_{он} = 0,30$  (а),  $0,60$  (б),  $0,70$  (в)



На основании формоизменения слоев в заготовке, расположения нейтральных линий, а также траекторий узлов координатных сеток составили качественную картину деформационных перемещений в меридиональном сечении (рисунок 9).

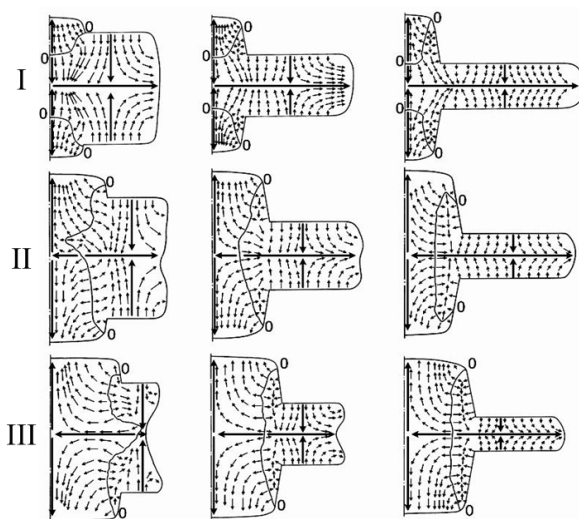


Рисунок 9 – Направления деформационных перемещений в заготовках.

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

**В четвертой главе** представлены результаты исследования конфигурации очага деформации при обжатии бойками с осевым отверстием.

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  $\varepsilon_{\text{он}} = 0,3; 0,6; 0,7$  (рисунок 10). 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, а при увеличении степени обжатия – в противоположном направлении.

При  $D_{отв}/D_0 = 0,72$  и  $\epsilon_{0H} = 0,3$  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.

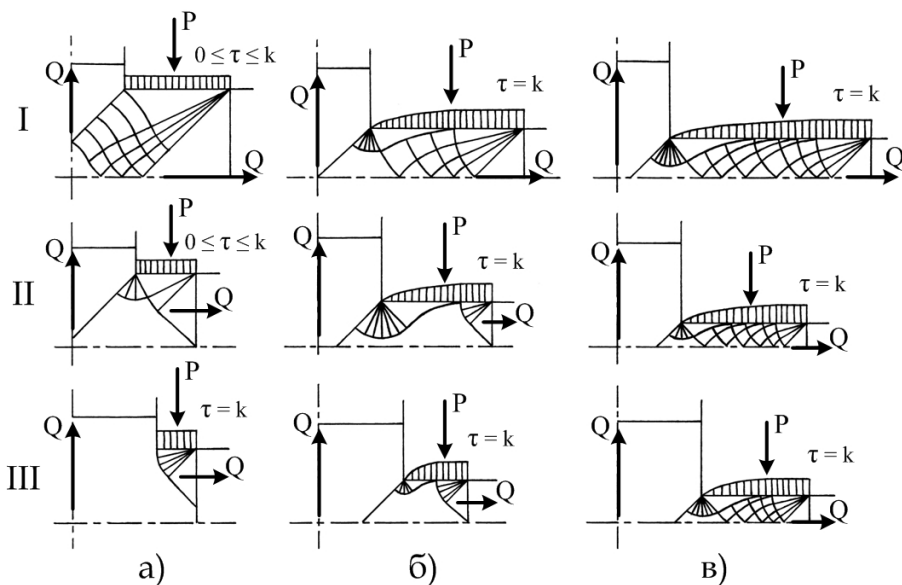


Рисунок 10 – Поля линий скольжения при осадке цилиндрических заготовок бойками с осевым отверстием для  $\epsilon_{0H} = 0,3$  (а), 0,6 (б) и 0,7 (в) при  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  (I), 0,55 (II) и 0,72 (III): P, Q – направления предписанных потоков пластического течения и потоков вытеснения;  $\tau$  – касательное напряжение трения; k – пластическая постоянная. Показано для 1/4 части заготовки.

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, можно заметить, что положение линий раздела течения металла и конфигурация пластических зон хорошо коррелируются с положением нейтральных линий и зонами значительных местных деформаций.

Для исследования очага деформации опробовали метод конечных элементов (рисунок 11) для заготовок с тремя соотношениями  $H_0/D_0$ , тремя соотношениями  $D_{отв}/D_0$  при 9 стадиях обжатия  $\varepsilon_{0H}$  с шагом 10%. Конфигурации очага деформаций в заготовке, обжатой на 30%, 60% и 70% сравнили с конфигурациями, полученными методом полей линий скольжения. Они хорошо коррелируются как по границам, так и по зонам.

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, составляемые из сочетаний полученных результатов.

Результаты, полученные методом конечных элементов, обладают хорошей наглядностью и при дополнительной обработке могут дать количественные данные о распределении деформаций. Можно определить размеры и положение зон деформации, а также границ между ними.

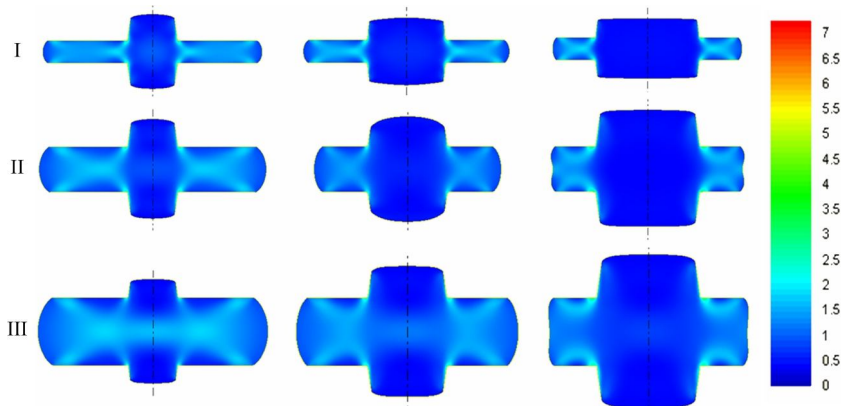


Рисунок 11 – Поля деформаций в обжатых заготовках.

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

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.

На поверхности разъема образца без координатной сетки можно выявить конфигурацию и границы зон деформации по «выдавленным» макрозернам свинца.

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

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

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.

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.

**В пятой главе** рассмотрены возможности промышленного применения результатов исследований в технологии получения поковок типа дисков.

Показана возможность деформационного воздействия на осевую усадочную полость, часто появляющуюся в удлиненных слитках с соотношением длины к диаметру 4-5 и более, из которых получают несколько заготовок.

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

Деформационное воздействие на осевую усадочную полость заключается в ее закрытии при осадке бойками с осевым отверстием. В зоне цапф и под ними располагается нейтральная поверхность – поверхность раздела пластических потоков. В сторону к оси заготовки от этой поверхности действуют встречные потоки вытеснения, вызывающие закрытие осевой усадочной полости с последующим выдавливанием ее в цапфы (рисунок 12).

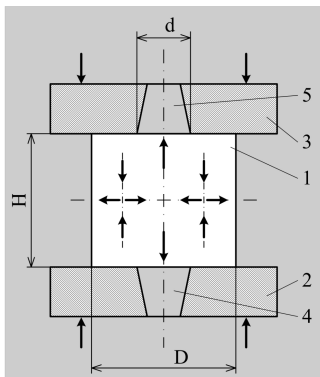


Рисунок 12 – Схема пластических потоков воздействующих на ОУП при осадке бойками с осевым отверстием

**В заключении** изложены итоги исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

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 расщепления 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 полотно 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  $D_{отв}/D_0 = 0,35$  при степени обжатия  $\varepsilon_{OH} = 0,7$ .

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 и в технологии получения поковок типа дисков.



Перспективы дальнейшей разработки темы

Распространить практическое применение полученных в диссертационной работе результатов путем перенесения их в промышленность.

Разработать мероприятия по применению новых бойков с осевым отверстием, снабженных коническими участками, рассмотренными в диссертации.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Савонькин М. Б., Тюрин В. А. Исследование осадки цилиндрических заготовок плоскими бойками с осевым отверстием // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2006, №9. С. 66.

2. Тюрин В.А., Савонькин М.Б. Стадийность процесса и потокораспределение при осадке плитами с осевым отверстием // Кузнечно-штамповочное производство. 2009. №3. С. 17-20.

3. Гузенко П.Ю., Тюрин В.А., Савонькин М.Б. Поля линий скольжения при осадке цилиндрических заготовок бойками с осевым отверстием // Известия вузов. Черная металлургия. 2009. №5. С. 69-70.

4. Савонькин М.Б., Тюрин В.А. Исследование течения материала в отверстие при осадке цилиндрических заготовок плитами с осевым отверстием // Кузнечно-штамповочное производство. 2009. №9. С. 9-11.

5. Савонькин М.Б., Тюрин В.А. Исследование течения материала при осадке цилиндрических заготовок бойками с осевым отверстием. // Прогрессивные технологии пластической деформации. – М.: МИСиС, 2009. С. 168-174.

6. Савонькин М.Б., Тюрин В.А. . Исследование зон деформации при осадке заготовок бойками с осевым отверстием // Сборник докладов

международной научно-технической конференции «Инновационные технологии обработки металлов давлением». – М.: МИСиС, 2011, С. 419-423.

7. Савонькин М.Б., Тюрин В.А. Структура очага деформации при осадке заготовок бойками с осевым отверстием // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2013. №5. С. 24 - 27.

8. M.B. Savon'kin and V.A. Tyurin Deformation-Zone Structure in Upsetting by Dies with an Axial Hole Steel in translation, Vol. 43, No. 5, 2013, С. 267 – 269

9. В.А. Тюрин, В.В. Овечкин, М.Б. Савонькин, Д.В. Батяев, И.В. Ларионов. Потоки пластического течения металла в условиях макродвигов // Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». Ч. 2. – М.: ООО «Белый ветер», 2014, С. 290-293

10. Савонькин М.Б., Тюрин В.А. Способы получения поковок для производства дисков и колес // Кузнечно-штамповочное производство. 2015. №4. С. 20-24

11. Тюрин В.А., Савонькин М.Б., Морозов А.В. Новое назначение осадки заготовок бойками с осевым отверстием // Кузнечно-штамповочное производство. 2016. №8. С. 26-28

12. Тюрин В.А., Овечкин В.В. , Савонькин М.Б. . Способ получения поковок типа дисков. Патент RU2412018. Бюл. №5, 20.02.2011