

С 30

На правах рукописи



Семашко Марина Юрьевна

**РЕАЛИЗАЦИЯ НОВОЙ СХЕМЫ
ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ИСХОДНОЙ ЗАГОТОВКИ**

Специальность 05.16.05.– Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск 2010

1231

Работа выполнена в Национальном исследовательском университете
ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор

Виктор Георгиевич Шеркунов

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор

Михаил Витальевич Чукин

Кандидат технических наук, доцент

Сергей Александрович Мырзин

Ведущая организация:

ЗАО НПО «БелМаг» (г. Магнитогорск)


Защита состоится «22» мая 2010 г. в 14⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.298.01 при НИУ ГОУ ВПО «Южно-Уральский
государственный университет» по адресу:

454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ

Автореферат разослан «19» мая 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор

 Д.А. Мирзаяев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Повышение качества макро- и микроструктуры, а следовательно, физико-механических свойств металлических изделий и полуфабрикатов, является одной из актуальных задач металлургии и машиностроения. Для решения таких задач созданы и продолжают создаваться инновационные способы, устройства и технологии получения материалов с заданной структурой и свойствами.

В настоящее время материалы с высоким уровнем физико-механических свойств получают методами порошковой металлургии, термомеханической обработкой, а также воздействием на материалы интенсивной пластической деформацией.

Все вышеперечисленные методы имеют свои достоинства и недостатки, а также порой являются малоприменимыми и сложноосуществимыми. Отдельные способы требуют сложного специального оборудования, что влечет за собой дополнительные капитальные вложения.

Для выпуска массовой продукции наиболее перспективны деформационные технологии, основанные, в частности, на развитии методов интенсивной пластической деформации (ИПД), т.е. процессов деформирования при температурах ниже порога рекристаллизации с высоким уровнем накопленной деформации.

В настоящей работе предлагается и исследуется новая схема интенсивной пластической деформации металлов, которая сочетает в себе известные операции: высадку, выдавливание в кольцевую полость, прошивку и обратное выдавливание. Преимущество данного способа перед другими заключается в осуществлении непрерывного (без извлечения полуфабриката из технологической оснастки) интенсивного деформирования металла, которое позволяет значительно измельчать структуру и изменять свойства исходного металла. Впоследствии изделия из таких материалов, обладая высоким комплексом физико-механических свойств, имеют большое значение для ускоренного развития металлургической, машиностроительной и других отраслей промышленности. В этом плане диссертационная работа является актуальной.

Цель и задачи работы: на основании накопленного опыта, математического и натурного моделирования, выполнить комплексное исследование новой схемы интенсивной пластической деформации металлов, приводящей к изменению микроструктуры исходной заготовки; разработать рекомендации по использованию рассматриваемого способа для получения полуфабрикатов с высоким уровнем механических свойств; разработать устройство для его осуществления.

Для достижения указанной цели поставлены следующие научные задачи:

— осуществить математическое моделирование исследуемого способа;

Уральский
гос. университет
НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА

- провести натурное моделирование способа интенсивной пластической деформации металлов;
- исследовать и проанализировать параметры очага деформации, определяющие эффективность деформации;
- исследовать особенности обработки и воздействие на микроструктуру при деформировании цветных металлов и сплавов;
- разработать рекомендации по изготовлению и использованию полуфабрикатов и готовых изделий, полученных рассматриваемым способом в промышленных условиях с целью повышения качества продукции.

Научная новизна

- предложена новая схема интенсивной пластической деформации металлов для изменения их микроструктуры и физико-механических свойств;
- впервые произведено компьютерное моделирование рассматриваемого способа в пакете DEFORM с целью выявления и исследования наиболее значимых параметров очага деформации, определяющих эффективность структурообразования, а также определения рациональной конструкции инструмента, условий деформирования, энергосиловых параметров процесса;
- впервые осуществлен комплекс натуральных экспериментов с детальным анализом полученных результатов, позволяющих оценить адекватность компьютерного моделирования;
- впервые, используя методы математического моделирования, статистической обработки результатов экспериментов, получена математическая модель расчета усилия обратного выдавливания P и величины C (величины, оценивающей степень дефектов, возникающих в результате деформирования) на стадии обратного выдавливания (из «стакана» в цилиндр);
- определены режимы деформирования образцов из цветных металлов и сплавов, при которых происходят процессы структурообразования, а также изменения их физико-механических свойств (повышение прочности и пластичности);
- на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований выработаны рекомендации по использованию изделий и полуфабрикатов, полученных исследуемым способом в промышленных условиях с целью повышения качества продукции;
- разработано устройство для получения полуфабрикатов методом интенсивной пластической деформации (заявка на способ и устройство пластического структурообразования находится на рассмотрении в ФГУ ФИПС).

Достоверность. Обусловлена наличием хорошей сходимости между результатами математического моделирования кинематических характеристик, параметров формоизменения при осуществлении процесса интенсивной пластической деформации с результатами лабораторных экспериментов. Для решения вариационных задач использовался современный пакет DEFORM, применяемый на многочисленных предприятиях и институтах в России и мире. При анализе результатов вычислительных и лабораторных экспериментов использовались методы статистической обработки.

Практическая значимость.

Разработан и исследован способ интенсивной пластической деформации металлов, предложено устройство для его осуществления, позволяющее непрерывно воздействовать на заготовку, создавая в ней значительные напряжения и деформации, вследствие чего измельчается микроструктура исходной заготовки.

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработан ряд технологических режимов, позволяющих изготовить полуфабрикаты из алюминиевого сплава АМгб и меди М1, а также других цветных металлов и сплавов с повышенными физико-механическими свойствами.

Предложена математическая модель расчета усилия обратного выдавливания P и величины C (величины, оценивающей степень дефектов, возникающих в результате деформирования) на стадии обратного выдавливания (из «стакана» в цилиндр);

Материалы диссертации используются в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности «Машины и технологии обработки металлов давлением» в Южно-Уральском государственном университете.

Апробация результатов работы. Основные положения работы и отдельные ее результаты доложены на следующих конференциях:

– 8-я Международная научно-практическая конференция по высоким технологиям и фундаментальным исследованиям (ВТ и ФИ) Высокие технологии, прикладные исследования, промышленность (г. Санкт-Петербург, 2009 г.);

– V-я научно-практическая конференция Научно-технический прогресс в металлургии, (г. Темиртау, Республика Казахстан, 2009 г.);

– III Международная Казахстанская металлургическая конференция (г. Караганда, Республика Казахстан, 2010 г.);

– II Международный конгресс «Цветные металлы – 2010», (г. Красноярск, 2010 г.);

– ежегодные научно-практические конференции ЮУрГУ (2003–2010 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 2 патента РФ, 7 статей и тезисов докладов. В числе изданий рекомендованных ВАК РФ по специальности

защиты опубликовано 5 статей, кроме того, 1 заявка на получение патента находится на рассмотрении в ФГУ ФИПС).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников из 158 наименований, содержит 190 страниц машинописного текста, приложений, 189 рисунков и 22 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и приведена общая характеристика работы.

Первая глава посвящена литературному и патентному обзору по вопросам современного состояния техники и технологии получения металлов с измененной структурой. Большой вклад в изучение процессов выдавливания внесен И.С. Алиевым, Ю.А. Алешинным, В.А. Головиным, С.И. Губкиным, И.Я. Тарновским, О.А. Ганаго, А.М. Дмитриевым, В.В. Евстеевым, П.С. Истоминым, А.Г. Овчинниковым, Л.И. Перлиным, Е.А. Поповым, И.П. Рене, А.Д. Томлевым, Л.А. Шофманом, В. Джонвоном, Х. Кудо, Э. Томсенем и др.

Важную роль в развитии технологии создания материалов высоким уровнем физико-механических свойств играет порошковая металлургия – метод, при помощи которого в настоящее время изготавливают широкий ассортимент порошковых и композиционных материалов.

На структуру металлов возможно влиять и при помощи методов высокотемпературной и низкотемпературной термомеханической обработки (ВТМО и НТМО) – совокупности операций деформации, нагрева и охлаждения (в различной последовательности), в результате которой происходит формирование окончательной структуры металла, а, следовательно, и его свойств в условиях повышенной плотности и оптимального распределения несовершенств строения, созданных пластической деформацией.

Важную роль в структурообразовании металлов играют методы интенсивной пластической деформации: деформация кручением под высоким давлением, всесторонняя ковка, интенсивная пластическая деформация (ИПД) равноканальное угловое прессование (РКУП), РКУП–конформ, метод «песочных часов», способ пластического структурообразования металлов при интенсивной пластической деформации, последний метод заключается в том, что сначала производят закрытую осадку, затем последовательно производят обратное выдавливание и прямое выдавливание с одного торца заготовки, а затем процесс повторяют с другого торца заготовки.

Произведенный литературный анализ позволил разработать на кафедре МиТОМД ЮУрГУ схему деформирования, сочетающую в себе операции высадки, выдавливания в кольцевую полость, прошивки и обратного выдавливания, а также устройство для его осуществления (рис. 1, 2).

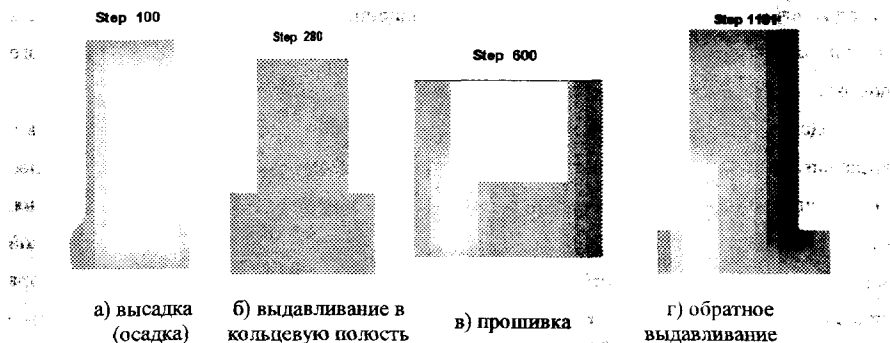


Рис. 1 – Предложенная схема деформирования

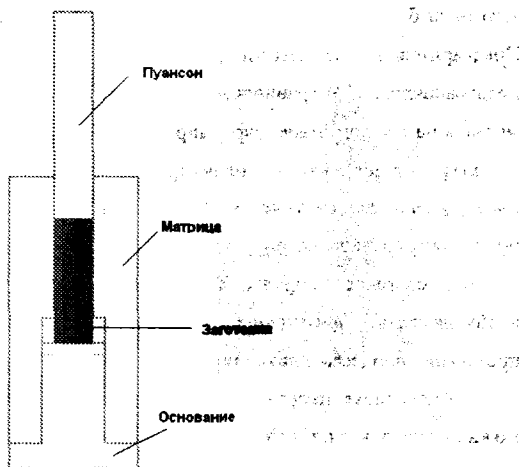


Рисунок 2 – Устройство для пластического структурообразования металлов

С целью выбора инструмента для дальнейших исследований произведен анализ современных средств моделирования процессов обработки материалов давлением, таких как ANSYS, LS-DYNA, CATIA, DELMIA, Simufact.Forming, DEFORM и пр. В силу ряда обстоятельств предпочтение было отдано пакету Deform.

На основании вышеизложенного были сформулированы цель и задачи настоящего исследования.

Вторая глава посвящена моделированию схемы интенсивной пластической деформации и анализу напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовки на каждом этапе цикла деформирования. Моделирование предложенного процесса производилось в пакете DEFORM-2D. Для расчетов НДС в данном пакете применяется метод конечных элементов – метод решения вариационных задач, который позволяет решать задачи, связанные со значительной деформацией, а также генератор автоматического построения сетки (AMG), который позволяет оптимизировать сетку.

Целью математического моделирования совмещенного процесса открытой осадки, выдавливания в кольцевую полость, закрытой прошивки и обратного выдавливания, выполненного в настоящей работе, является анализ предложенной схемы деформирования, исследование напряженно-деформированного состояния, возникающего в металлической заготовке, определение потребного усилия деформирования для дальнейшего выбора силового оборудования, а так же выработки ряда рекомендаций для натурного проектирования технологической оснастки.

Процесс осуществлялся в устройстве, представленном на рисунке 2, в качестве заготовки был выбран круг $\varnothing 35$ мм, высотой 120 мм, материал заготовки алюминий АД1. Предварительно на заготовку было нанесено 9 точек: 1-3 в центральном, 4-6 в предграницном, 7-9 граничном слоях заготовки с целью более точного анализа течения металла на каждом этапе деформирования. Поэтапно каждая стадия способа пластического структурообразования с иллюстрацией распределения интенсивности деформаций представлена на рисунке 3. Величина интенсивности деформации в каждой точке проиллюстрирована на рисунке 4. Усилие деформирования необходимое для протекания процесса составляет порядка 36 т. На этапе компьютерного моделирования была выявлена необходимость применения противодавления, которое обеспечивает стабильность протекания процесса и ликвидирует образование дефектов (рис. 5).

Анализируя напряжения и деформации, возникающие в деформируемой заготовке можно сделать вывод, что на протяжении цикла деформирования в сечении возникают как растягивающие, так и сжимающие напряжения и деформации. Наибольшее течение металла наблюдается в центральной области под пуансоном. Интенсивность деформаций достигает 3-11 после одного цикла деформирования (рис. 3).

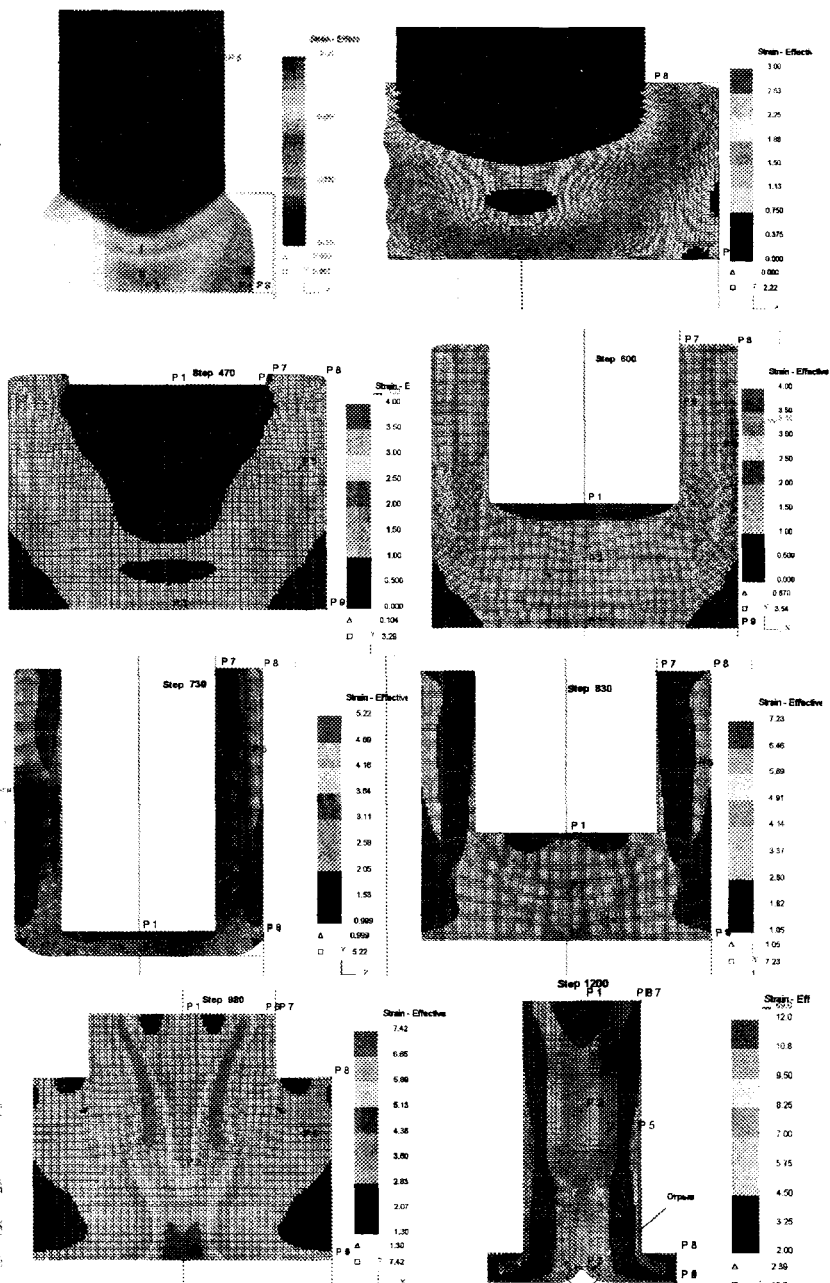


Рис. 3. Распределение интенсивности деформации в исследуемых точках на каждом этапе цикла деформирования

Интенсивность деформаций

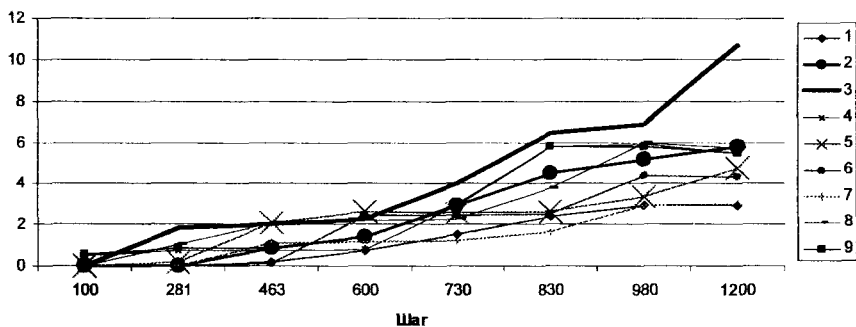


Рис. 4. Величина интенсивности деформации в каждой точке

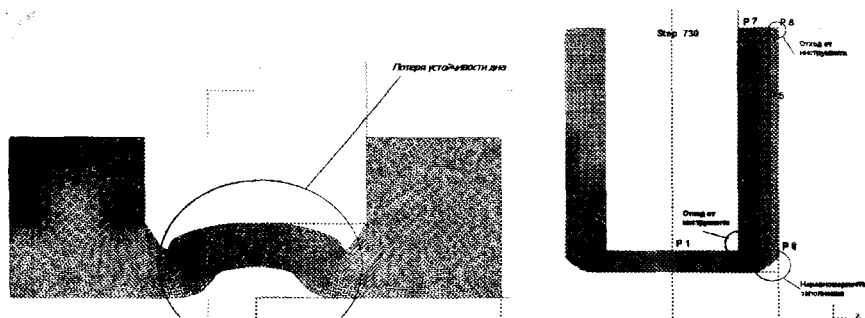


Рис. 5. Выявленные дефекты

Третья глава посвящена натурным экспериментам, которые являются ключевыми в цикле научных исследований. Они позволяют на практике подтвердить или опровергнуть все возможные гипотезы и предположения. В рамках главы проводились параллельные натурные и компьютерные эксперименты, позволяющие наиболее полно изучить способ структурообразования.

Для проведения исследований была разработана конструкция штамповой оснастки и изготовлен штамп, состоящий из основания, подвижной матрицы и пуансона (рис. 6).

В качестве экспериментальных образцов использовались отлитые свинцовые заготовки, состоящие из двух половин, на одну из которых была нанесена сетка, при помощи иглы, закрепленной в инструментальном микроскопе. Параллельно производилось моделирование процесса в программе DEFORM 2D.

На рисунке 7 представлены все стадии рассматриваемого процесса.

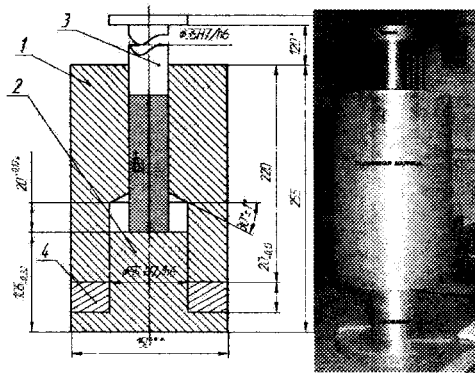
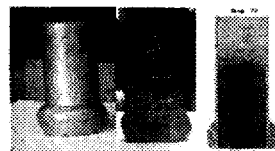
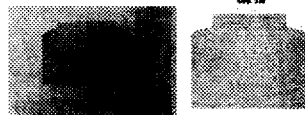


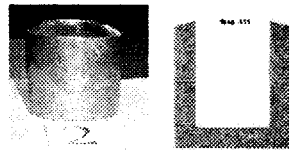
Рис. 6 – Штамповая оснастка



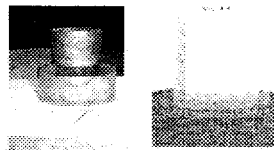
а) Свободная осадка



б) Закрытая осадка



в) Закрывающая прошивка



г) Обратное выдвигание

Рис. 7. – Стадии процесса

В ходе проведения натурного эксперимента были получены качественные образцы различных конфигураций с измененной макро и микроструктурой (рис. 8), было оценено и описано качество деформируемых образцов на каждом переходе цикла исследуемого процесса, определено требуемое усилие деформирования и степени деформаций в радиальном и продольном направлениях (табл. 1).

Проведенное исследование показало хорошую сходимость результатов компьютерного моделирования в пакете DEFORM 2D и натурного эксперимента. На каждом переходе величины усилий, полученных путем компьютерного моделирования, отличаются от натуральных на 6–8 % (табл. 1). Значение степеней деформации, полученные при компьютерном и натурном эксперименте несколько отличаются (9–26 %, табл. 1), что в данном случае незначительно, поскольку невелика разница в натуральных значениях этих показателей.

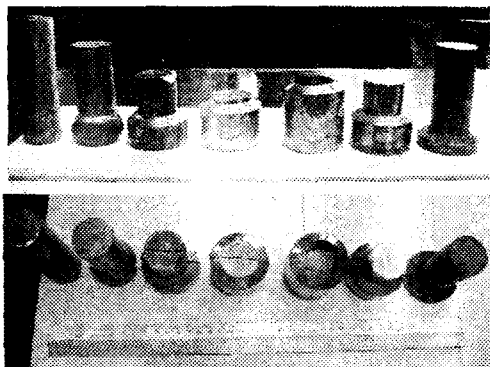


Рис. 8 – Формоизмененные заготовки

Табл. 1

Сравнение компьютерного и натурального экспериментов

свободная осадка								
рад. деф.			прод. деф.			усилие, кН		
нат.	мод.	расхожд в %	нат.	мод.	расхождение в %	нат.	мод.	расхождение в %
0,44	0,37	15,0	-1,0	-0,74	26,0	60-70	56,4	6,0
закрытая осадка								
рад. деф.			прод. деф.			усилие, кН		
нат.	мод.	расхожд в %	нат.	мод.	расхожд в %	нат.	мод.	расхожд в %
-1,76	-1,59	9,0	-2,3	-1,8	21,0	100	93,2	6,8
закрывающая прошивка								
рад. деф.			прод. деф.			усилие, кН		
нат.	мод.	расхожд в %	нат.	мод.	расхожд в %	нат.	мод.	расхожд в %
	1,49			-2,75		150	160	6,25
обратное выдавливание								
рад. деф.			прод. деф.			усилие, кН		
нат.	мод.	расхожд в %	нат.	мод.	расхожд в %	нат.	мод.	расхожд в %
	-1,71					300	328	8,5

Для дальнейшего натурального моделирования в качестве заготовок были выбраны образцы из свинцового сплава, образцы из сплава АМг6 и медные образцы М1 размерами: высота 120 мм и Ø35 мм (рис. 9). Исследования осуществлялись на гидравлическом прессе в лаборатории кафедры МнГОМД. Деформационные процессы осуществлялись в холодном и

горячем состоянии. Замер температуры производился при помощи лазерного температуроизмерителя. В качестве нагревательного устройства был использован ТЭН, расположенный на нижней траверсе пресса, в полость которого помещалась технологическая оснастка (рис. 10).

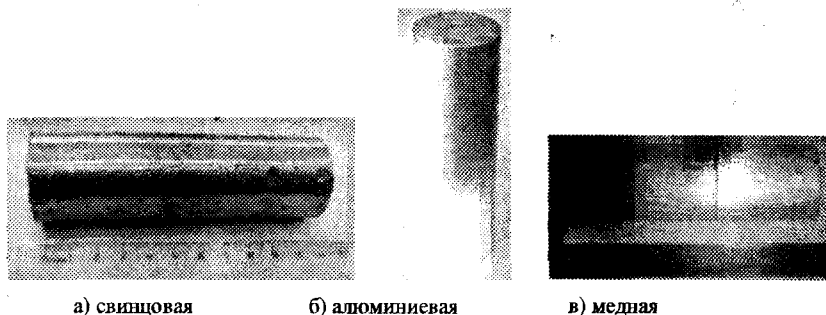


Рис. 9. Исходные заготовки

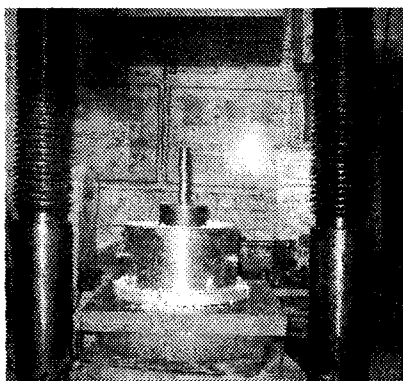
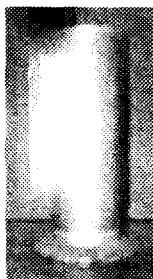


Рис. 10. Расположение на столе пресса

Максимальное количество циклов непрерывной деформации, которым были подвержены свинцовые образцы – 1–7, образцы из сплава АМгб – 1–3, медные образцы подвергались 1–9 циклам деформации (рис. 11). Все исходные медные образцы с целью повышения пластичности предварительно отжигались при температуре $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ и охлаждались в воде. Деформация свинцовых и 2х медных образцов осуществлялась в холодном состоянии. Алюминиевые образцы разогревались до температуры порядка $350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оставшиеся медные образцы деформировались при температуре ниже температуры рекристаллизации $< 200\text{ }^{\circ}\text{C}$.



а) свинцовая



б) алюминиевая



в) медная

Рис. 11. Деформированные заготовки

Для анализа механических свойств материалов были подготовлены стандартные образцы на растяжение. Образцы вытачивались при помощи лезвийного инструмента из исходной заготовки и заготовок, подверженных деформированию по предложенной схеме. В результате которых, были построены кривые упрочнения для исходного и подверженного одному циклу деформирования образцов из сплава АМг 6 (рис. 12, табл. 2). На рисунке 13 представлена диаграмма растяжения 4х образцов. Образец № 1 – исходный, № 2 – после 3 циклов деформации, образец № 3 – после 5 циклов, образец № 4 – после 7 циклов деформирования. Данные механических испытаний приведены в таблице 3.

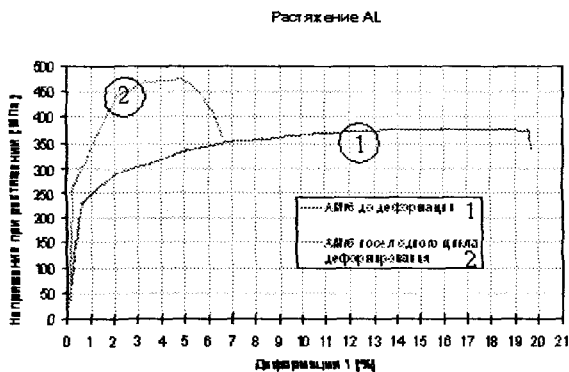


Рис. 12. Кривые упрочнения деформированной и исходной заготовок

Табл. 2

Данные механических испытаний АМг6 на растяжение

	Максимальная нагрузка (Н)	Максимум напряжения при растяжении (МПа)	Деформация при растяжении (разрыв) (мм/мм)	Диаметр (мм)
1	7 477,06	375,30	0,197	5,0021
2	9 415,24	473,87	0,066	5,0060

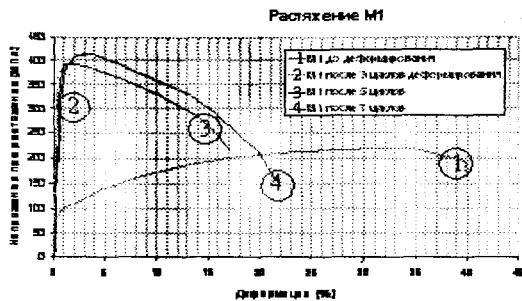


Рис. 13. Кривые упрочнения деформированных и исходной заготовок

Табл. 3

Данные механических испытаний АМг6 на растяжение

	Максимальная нагрузка (Н)	Максимум напряжения при растяжении (МПа)	Деформация при растяжении (разрыв) (мм/мм)	Диаметр (мм)
1	4 349,80	218,89	0,399	5,0300
2	7 370,24	370,89	0,023	5,0300
3	7 982,09	393,82	0,171	5,0800
4	8308,83	415,86	0,216	5,0300

Испытания на растяжения образцов из сплава АМг 6 показали, что за один цикл деформирования заготовка значительно упрочняется. Критическое значение напряжения при растяжении возрастает с 375 до 473 МПа. Но также следует сказать об уменьшении зоны пластичности. Относительное удлинение уменьшается с 19 до 6 %.

Из рисунка 13 и таблицы 3 видно, что медные образцы, подверженные деформированию по предложенной схеме после 7 циклов значительно упрочняются, его максимальное напряжение при растяжении достигает 415 МПа, что практически в два раза превышает значение напряжения растяжения для недеформированного образца 218,89 МПа.

Важно отметить заметное увеличение пластичности испытуемых образцов. Если после трех циклов деформирования относительное удлинение составляло 2,3 %, то после 7 циклов деформирования это значение составило 21,6 %.

Последующие эксперименты подтвердили наметившуюся тенденцию к увеличению прочности и пластичности. Максимальное количество циклов деформирования без разрушения образца на лабораторном оборудовании достигало 9, при этом усилие деформирования превышало 5000 кН.

Повышение прочности и пластичности говорит о том, что в результате экспериментальных исследований по предложенной схеме был подобран оптимальный режим изотермического деформирования медных образцов, при котором медные заготовки

постоянно подогревались до температуры, не превышающей температуру рекристаллизации, был учтен деформационный разогрев и небольшие скорости деформирования.

Для оценки изменений в структуре образцов из центральной части деформированных и исходных заготовок были вырезаны шлифы размерами по $h=10$ мм и $\varnothing 35$ мм (рис. 14).



Рис. 14. Шлифы

Свинцовые образцы были обработаны следующим составом: 100 мл глицерина, 9 мл ледяной уксусной кислоты и 9 мл HNO_3 . Образцы выдерживались в травителе в течение 10–15 мин.

В качестве травителя для АМг6 был выбран состав Келлера: 10 см³ HF; 15 см³ HCl; 90 см³ H₂O.

Для меди М1 травителем был выбран $CuCl_2$ 7% в NH_4OH .

Размеры зерен до деформации и после оценивались известным методом выявления и определения величины зерна.

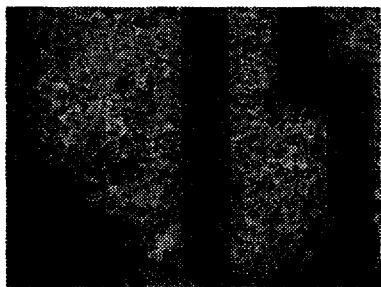
После анализа данных, полученные в результате исследований по свинцовым заготовкам можно сделать вывод, что в среднем размер зерна уменьшился после 5 полных циклов деформирования в ≈ 3 –5 раз.

Однако нужно отметить, что свинец является материалом с низкой температурой рекристаллизации и не исключено, что изученная картина, может несколько отличаться от той, что имела место непосредственно после деформации.

Результаты исследования микроструктуры АМг 6 приведены на рисунке 15 а – до деформирования и 15 б после одного полного цикла деформирования.

Сплав АМг6 с добавками марганца (5,8–6,8%) склонен к пресс-эффекту. При горячем деформировании выделяющиеся частицы интерметаллидов на основе марганца закрепляют элементы дислокационной структуры горячедеформированного сплава. Они затрудняют процесс рекристаллизации. В результате горячего прессования (а в исходном состоянии АМг6 находился именно в таком состоянии) фиксируется полигональная структура (рисунок 15 а). Причем, трудно разделить границы зерна и субзерна. То есть уже в исходном состоянии присутствует субзерно размером ≈ 10 мкм. За один полный цикл предлагаемого

процесса горячего деформирования структура АМг6 приобретает более «тонкое» строение. Размер субзерен уменьшается до ≈ 3 мкм.

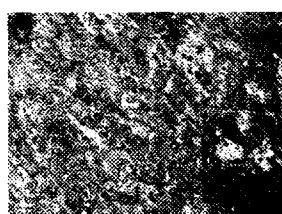
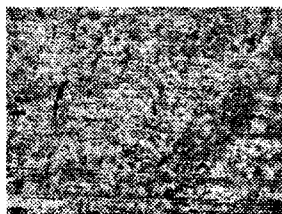


а) до деформирования

б) после одного цикла

Рис. 15 – Структура образцов АМг6

Результаты исследования микроструктуры М1 приведены на рисунке 16 а – до деформирования, 16 б после трех циклов деформирования, 16 в после 5 циклов деформирования.



а) до деформации

б) после 3х циклов

в) после 5 циклов

Рис. 16. Структура образцов М1

Анализируя полученные данные можно сделать вывод, что после 5 полных циклов деформирования размер зерна медного образца уменьшился в среднем в 5,1 раза (с 3,06 мкм до 0,59 мкм).

Таким образом, в результате экспериментальных исследований был получен упрочненный образец с измельченной структурой. Следует отметить, что с увеличением циклов обработки до 7 вместе с прочностью повышается пластичность образца.

В четвертой главе используя статистические методы математического моделирования получены зависимости усилия деформирования P и величины C от технологических параметров на начальной стадии операции обратного выдавливания.

Величина C – относительная величина, предложенная автором, позволяющая оценить размер возникающего дефекта на операции обратного выдавливания, определяемая по формуле

$$C = \frac{h_o - h_1}{h_o} \quad (1)$$

Очевидно, что усилие необходимое для начала осуществления операции обратного выдавливания будет зависеть от ряда технологических факторов, таких как: механические свойства обрабатываемого материала, соотношение геометрических размеров инструмента, колебания высоты дна «стакана», величины усилия противодавления, коэффициента трения, скорости перемещения матрицы и др (рис. 17). Немаловажным в операции обратного выдавливания является и то, что в начале данной операции наблюдается потеря устойчивости дна стакана, сопровождаемая отходом металла от инструмента и образованием характерной складки. Для более качественной оценки дефекта при осуществлении операции обратного выдавливания автор видит целесообразным вести относительную величину C , которая позволит охарактеризовать высоту отхода металла от инструмента.

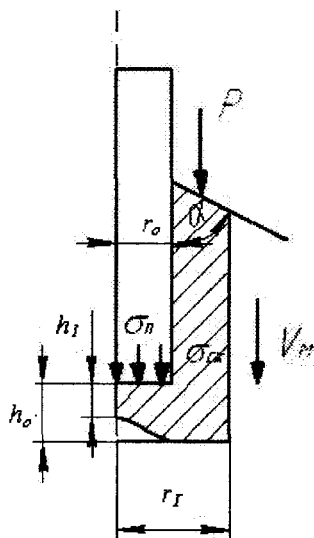


Рис. 17 – Обратное выдавливание

В данном случае рассматривался дробный факторный эксперимент $1/8$ реплики от ПФЭ типа 2^{7-3} . В качестве варьируемых факторов были выбраны (рис. 17): $\sigma_{сж}$ – напряжение сжатия, МПа; r_I/r_o – отношение радиусов матрицы и пуансона; $\sigma_n/\sigma_{сж}$ – отношение напряжений, создаваемых в металле под воздействием противодавления к пределу прочности

на сжатие; μ – коэффициент трения между поверхностями сопряжения; v_m – скорость перемещения матрицы, м/с; α – угол конусности внутренней поверхности матрицы; $l_0/2r_0$ – отношение высоты заготовки к ее диаметру. Функцией отклика явились усилие деформирования P и величина C .

После того, как был составлен план эксперимента, каждый опыт был смоделирован в пакете программ DEFORM-2D. После реализации факторного эксперимента 2^{7-3} были получены уравнения регрессии для расчета усилия деформирования P (2) и величины C (3):

уравнение (2)

$$y_1 = 84 + 58,21x_1 + 39,5x_2 + 9,35x_3 + 7,34x_4 + 2,07x_5 + 3,54x_6 + 0,44x_7 + 0,71x_1x_3 + 0,71x_1x_6 + 0,71x_3x_6 + 0,78x_1x_5 + 0,78x_2x_5 + 0,78x_4x_7 + 1,375x_1x_7 + 1,375x_3x_5 + 1,375x_4x_6 + 1,09x_2x_7 + 1,09x_4x_5 + 1,09x_3x_6 \quad (2)$$

уравнение (3)

$$y_2 = 26,788 + 1,013x_1 - 3,40x_2 - 22,375x_3 + 1,275x_4 - 1,975x_5 - 4,975x_6 + 0,325x_7 - 0,01x_1x_3 - 0,01x_2x_6 - 0,01x_3x_7 - 0,05x_1x_6 - 0,05x_2x_5 - 0,05x_4x_7 + 0,04x_1x_7 + 0,04x_3x_5 + 0,04x_4x_6 + 0,03x_2x_7 + 0,03x_4x_5 + 0,03x_3x_6 \quad (3)$$

Уравнения с действительными коэффициентами для расчета усилия:

$$P = 0,181 \cdot \sigma_s - 16,1 \cdot \mu - 18,3 \cdot \alpha + 157,0 \cdot \frac{r_1}{r_0} - 22,9 \cdot \frac{l_0}{r_0} + 5,65 \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_s} - 64,4 \cdot v + 0,00828 \cdot \sigma_s \cdot \alpha + 78,8 \cdot \mu \cdot \alpha + 10,2 \cdot \alpha \cdot \frac{r_1}{r_0} + 0,01 \cdot \sigma_s \cdot \frac{l_0}{r_0} + 31,2 \cdot \mu \cdot \frac{l_0}{r_0} + 10,9 \cdot \frac{r_1}{r_0} \cdot \frac{l_0}{r_0} + 12,5 \cdot \alpha \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_s} + 5,68 \cdot \frac{l_0}{r_0} \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_s} + 0,0188 \cdot \sigma_s \cdot v + 156 \cdot \mu \cdot v + 139 \cdot \frac{r_1}{r_0} \cdot v + 39,3 \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_s} \cdot v - 196,3 \quad (4)$$

Уравнения с действительными коэффициентами для расчета величины C :

$$C = -0,00031 \cdot \sigma_s - 0,417 \cdot \frac{r_1}{r_0} - 1,34 \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_s} + 3,03 \cdot \mu + 1,69 \cdot v - 0,208 \cdot \alpha - 0,311 \cdot \frac{l_0}{r_0} - 0,0000106 \cdot \sigma_s \cdot v - 0,000531 \cdot \sigma_s \cdot \alpha - 1,79 \cdot \frac{r_1}{r_0} \cdot v + 0,000252 \cdot \sigma_s \cdot \frac{l_0}{r_0} - 0,00573 \cdot \frac{r_1}{r_0} \cdot \alpha + 0,971 \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_s} \cdot v + 0,3 \cdot \frac{r_1}{r_0} \cdot \frac{l_0}{r_0} + 0,344 \cdot \frac{r_1}{r_0} \cdot \alpha + 4,29 \mu v - 0,0032 \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_s} \cdot \frac{l_0}{r_0} + 1,948 \cdot \mu \cdot \frac{l_0}{r_0} - 2,0 \mu \cdot \frac{l_0}{r_0} + 1,102 \quad (5)$$

причем численные значения коэффициентов учитывают различие в размерностях P , C и переменных параметров.

Наибольшее влияние на величину усилия деформирования оказывает марка материала, а именно такой фактор, как предел прочности. Таким образом, чем выше значение временного сопротивления, тем больше усилия требуется для осуществления процесса деформирования. Также значительное влияние на величину усилия оказывает соотношение размеров матрицы и пуансона, а именно величина r_1/r_0 . Значительно меньшее влияние на функцию отклика оказывают такие факторы, как $\sigma_n/\sigma_{сж}$ – отношение

напряжений, создаваемых в металле под воздействием противодействия к напряжению сжатия и коэффициент трения. Еще меньшее влияние на усилие деформирования оказывают скорость перемещения матрицы, α - угол конусности внутренней поверхности матрицы, длина заготовки, а также парные взаимодействия вышеперечисленных факторов.

Наибольшее влияние на величину C оказывает соотношение $\sigma_n / \sigma_{сж}$ – отношение напряжений, т.е. наличие или отсутствие противодействия (63 %). При равенстве соотношения 0,5 величина C наименьшая, что говорит о качественном протекании процесса деформации. Значительно меньшее влияние оказывает α - угол конусности внутренней поверхности матрицы, – 14 % и соотношение размеров матрицы и пуансона – 9,6 %. Очень незначительное влияние на величину C оказывают эффекты взаимодействия факторов.

В пятой главе сделан ряд рекомендаций для практического применения получаемых полуфабрикатов. Так из упрочненных цилиндрических полуфабрикатов с измененной микроструктурой возможно изготовить лопатки газотурбинного двигателя (ГТД) (рис. 18), поршни цилиндров, работающих при больших нагрузках. Полуфабрикаты показанные на рисунке 19 могут использоваться в качестве заготовок для термомеханических муфт (рис. 20).

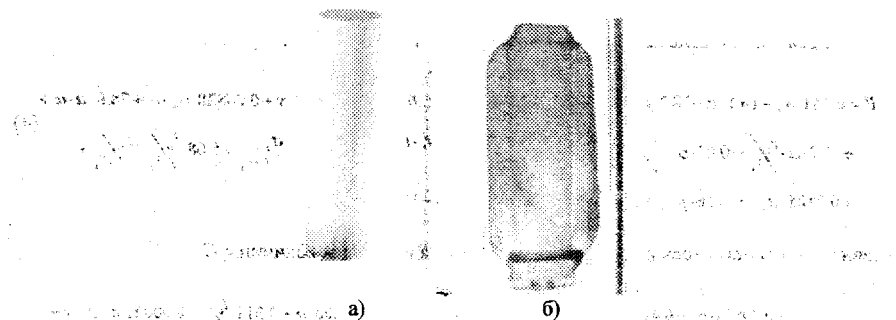


Рис. 18 – Использование ИПД технологии для сплава ВТ-6:

а – исходная заготовка; б- отштампованная из УМЗ полуфабриката заготовка детали ГТД (адаптировано [132])

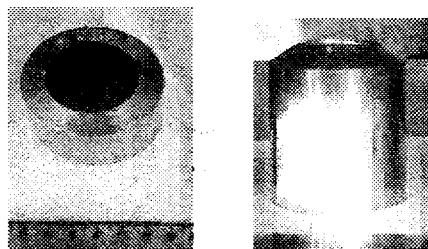


Рис. 19 – Заготовки термомеханических муфт, полученных способом пластического структурообразования

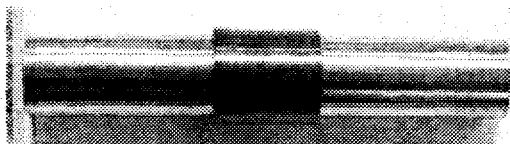


Рис. 20 – Использование термомеханических муфт

Большие перспективы для массового использования технологий ИПД имеют разработки, направленные на получение высокопрочных полуфабрикатов из УМЗ низкоуглеродистых марок стали (0,08-0,2% С) для метизной продукции повышенного качества. Исследуемый в данной работе способ пластического структурообразования позволяет получать упрочненные цилиндрические заготовки для метизной промышленности, заготовки под габаритные болты, а также заготовки под гайки (рис. 21).

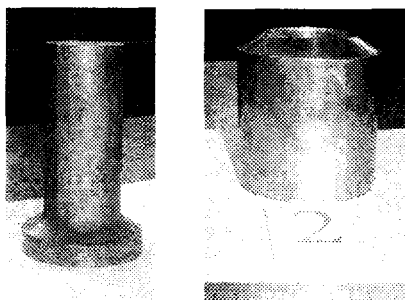


Рис. 21 – Конфигурация получаемых заготовок

Одним из направлений повышения эффективности кумулятивных зарядов с металлическими облицовками является совершенствование исходной микроструктуры облицовок. Ранее произведенные исследования на меди М1 показали значительные преимущества ультрамелкозернистой (УМЗ) меди перед крупнокристаллической (КК) медью в качестве металлической облицовки. Струи, образованные УМЗ медью имели меньшее количество фрагментов, большую суммарную длину фрагментов, а также увеличение средней длины фрагмента, увеличение скорости и продолжительность воздействия. Глубина пробития струй из УМЗ меди также оказалась выше, чем у струй КК меди.

Заготовки, полученные способом пластического структурообразования из меди М1 могут быть использованы в качестве заготовок для последующего изготовления металлических облицовок кумулятивных снарядов (рис. 22).

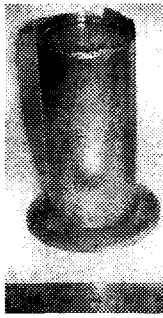


Рис. 22 – Заготовка из меди М1

Способ пластического структурообразования металлов позволяет получать цилиндрические заготовки с измельченной структурой из черных и цветных металлов и сплавов с широкой номенклатурой форм и размеров.

В данной главе также предложено промышленное устройство пластического структурообразования, которое находится на этапе рассмотрения в ФГУ ФИПС и имеет номер заявки.2009146844.. (рис.23).

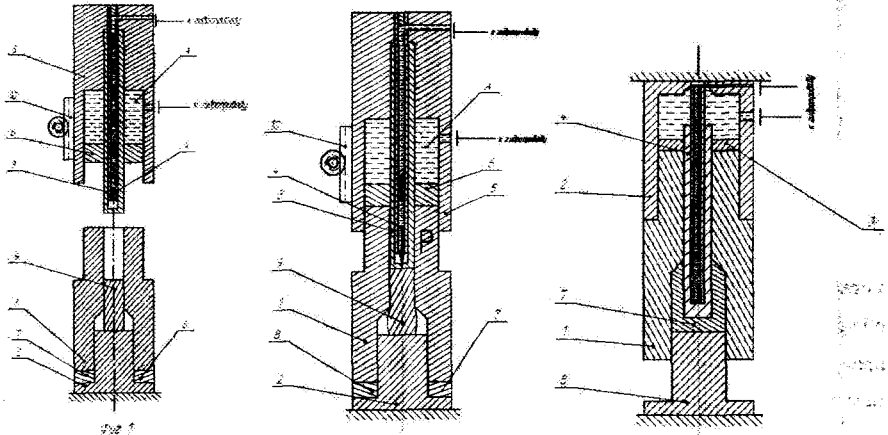


Рис. 23 – Схема устройства для осуществления способа

Устройство для способа пластического структурообразования металлов содержит матрицу 1 и пуансоны, наружный выполненным полимером и представляет собой гидроцилиндр 2 с плунжером 3, внутри упомянутого пуансона расположен внутренний пуансон 4 с полостью 5. Матрица 1 в которой располагают заготовку 6 установлена на ступенчатой плите 7 с шероховатой поверхностью. Между матрицей и основанием ступенчатой плиты

располагаются два полукольца 8 и 9, высота которых равна высоте свободной полости при свободной осадке.

Устройство работает следующим образом.

На основание ступенчатой плиты 7 монтируются два полукольца 8 и 9. Металлическую заготовку 6 помещают в матрицу 1, уставовленную на полукольцах 8 и 9 до упора в верхнее основание ступенчатой плиты 7. Затем на заготовку 6 при помощи механизма подачи 10 устанавливают устройство: наружный пуансон, состоящий из гидроцилиндра 2 с плунжером 3 и внутренний пуансон 4 с полостью 5. Под воздействием рабочей жидкости, функционирующей в полости 5 внутреннего пуансона 4, он начинает свое движение вниз и создает необходимое усилие деформирования P , при помощи которого осуществляется высадка заготовки. При заполнении свободной полости матрицы начинается процесс выдавливания в кольцевую полость, при котором матрица 1 начинает поднимать плунжер 3 гидроцилиндра 2. В свою очередь плунжер 3 создает необходимую величину противодействия P_1 на верхний торец матрицы 1 и боковую часть заготовки 6 для равномерного заполнения рабочей полости материалом заготовки 6. В момент внедрения внутреннего пуансона 4 в тело заготовки 6 начинается процесс закрытой прошивки, который, при прохождении металлом более 90 % от первоначальной высоты заготовки, останавливается и начинается процесс обратного выдавливания подвижной матрицей 1. В момент начала обратного выдавливания из устройства извлекаются полукольца 8 и 9 (с целью максимальной проработки материала заготовки). На плунжер 3 гидроцилиндра 2 начинается воздействие рабочей жидкости под давлением, необходимым для создания усилия деформирования $P_{обр}$. В свою очередь во внутреннем пуансоне 4 происходит слив рабочей жидкости из полости 5 до величины давления, достаточного для создания усилия противодействия $P_{обр 1}$, необходимого для равномерного течения процесса выдавливания, а именно: препятствующего потери устойчивости дна и отходу металла от верхней поверхности ступенчатой плиты 7 в районе серединной линии в процессе выдавливания. При остатке недеформированного металла не более 10 % цикл повторяется необходимое число раз до получения однородной равноплотой структуры материала заготовки.

Предложенное устройство целесообразно использовать в заготовительном производстве машиностроительных предприятий для получения заготовок с измельченной однородной равноплотной структурой для дальнейшего изготовления высоконагруженных деталей.

Устройство в разрезе (рис. 1)

1 - матрица; 2 - гидроцилиндр; 3 - плунжер; 4 - пуансон; 5 - полость; 6 - заготовка; 7 - ступенчатая плита; 8 - полукольцо; 9 - полукольцо; 10 - механизм подачи.

В настоящей работе предложена и изучена схема интенсивной пластической деформации металлов, состоящая из комбинации уже известных операций высадки, выдавливания в кольцевую полость, закрытой прошивки и обратного выдавливания, повторяющихся циклически, направленная на измельчение структуры исходной заготовки, с целью изменения ее физико-механических свойств:

1. На основании анализа современного состояния техники и технологий получения металлов с измененной микроструктурой была предложена новая схема интенсивной пластической деформации с целью структурообразования металлов, включающая в себя последовательность операций высадки, выдавливания в кольцевую полость, прошивки и обратного выдавливания.

2. Детально исследовано поведение заготовки на каждом этапе цикла обработки при помощи моделирования в пакете DEFORM. Оценено течение металла на каждой стадии цикла обработки в граничном, предграничном и центральном слоях заготовки. В процессе моделирования выявлены дефекты каждой операции и сделан вывод о необходимости применения противодействия в процесс обработки. Проанализировав напряженно-деформированное состояние заготовки на каждой операции цикла можно заключить, что уже при осуществлении одного цикла обеспечиваются значительные деформации, которые в свою очередь, приведут к изменениям в микроструктуре заготовки.

3. На основании полученных результатов разработана и изготовлена технологическая оснастка для осуществления процесса структурообразования металлов, позволяющая осуществлять процесс структурообразования металлов с рабочим усилием на пуансоне до 5000 кН, и температурой эксплуатации до 900 °С. Данная оснастка впервые позволила осуществить исследуемый процесс.

4. Проведенные исследования на свинцовых заготовках, на которые предварительно наносилась координатная сетка, позволили сделать вывод:

- о достаточно хорошей сходимости натурального и компьютерного экспериментов;
- оценить напряженно-деформированное состояние свинцовых образцов при компьютерном и натурном моделировании;
- определить силовые параметры процесса.

Анализ структуры свинцовых образцов, показал, что размер зерна свинцовых образцов уменьшился в 3 раза.

5. Предложенная схема обработки давлением была опробована на алюминиевых образцах в температурном диапазоне 300 – 350 °С. В результате были получены

упрочненные массивные заготовки диаметром 35 мм с измельченной в 3 раза структурой уже после одного цикла деформирования.

6. Обработка медных заготовок по предложенной технологии позволила повысить пределы прочности и пластичности исходных образцов и измельчить их структуру в 5 раз. Обработка велась в теплом состоянии, при постоянном подогреве технологической оснастки и образца до 100 °С.

7. Используя статистические методы математического моделирования получены зависимости усилия деформирования P и величины C^1 , отражающей эффект потери устойчивости в зависимости от варьируемых факторов ($\sigma_{сж}$ – напряжение сжатия; r_1/r_0 – отношение радиусов матрицы и пуансона; $\sigma_n/\sigma_{сж}$ – отношение напряжений, создаваемых в металле под воздействием противодавления к пределу прочности на сжатие; μ – коэффициент трения между поверхностями сопряжения; v_m – скорость перемещения матрицы, м/с; α – угол конусности внутренней поверхности матрицы; $l_0/2r_0$ – отношение высоты заготовки к ее диаметру) на начальной стадии операции обратного выдавливания.

8. Проанализированы возможные применения предложенного способа в условиях современного производства. Данный способ позволяет получать упрочненные, пластичные изделия и полуфабрикаты для энергетики, автомобильной и авиационно-космической промышленности. Заготовки, полученные с использованием данной схемы деформирования износостойки и долговечны.

9. Предложена конструкция установки для промышленной реализации разработанного способа.

С. В. Шибанов, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Металлургия»
А. В. Шибанов, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Металлургия»

¹ Относительная величина, предложенная автором, позволяющая оценить размер возникающего дефекта на операции обратного выдавливания

1. Семашко М.Ю., Экк А.Е. Получение изделий с ультрамелкозернистой структурой. Наука и технологии. Серия технологии и машины обработки материалов давлением. М., РАН, – 2005. – С. 181–184.
2. Семашко М.Ю., Экк А.Е., Шеркунов В.Г. Математическое моделирование процесса непрерывного прессования Конформ. Вестник Магнитогорского государственного технического университета, Магнитогорск, МГТУ № 4, 2006, С. 45–47. **(рецензируемое издание, рекомендованное ВАК РФ)**.
3. Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г. Моделирование процесса пластического структурообразования металлов в пакете Deform. Научно-технический прогресс в металлургии (сборник научных трудов) – Алматы, РИК, 2009 – С. 375–387.
4. Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г. Моделирование нового способа интенсивной пластической деформации для измельчения структуры металлов в пакете Deform. Сборник трудов 8й международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» – Санкт-Петербург, 2009 – С. 105–107. **(рецензируемое издание, рекомендованное ВАК РФ)**.
5. Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г., Карева Н.Т., Экк Е.В. Девормирование натуральных образцов из свинца и алюминия с целью экспериментального исследования способа пластического структурообразования металлов. Известия МГТУ им. Носова, Магнитогорск, 2010 г. С. 46–49 **(рецензируемое издание, рекомендованное ВАК РФ)**.
6. Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г., Экк Е.В. Моделирование процесса интенсивной пластической деформации для измельчения структуры металлов. Известия ТулГУ, Технические науки, вып. 2, часть 2. Изд-во Тул-гу, 2010 г. – С. 23–28. **(рецензируемое издание, рекомендованное ВАК РФ)**.
7. Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г., Экк Е.В., Трусовский В.И., Мезенцев В.М. Экспериментальное исследование способа пластического структурообразования металлов, Вестник ЮУрГУ, Челябинск, 2010 г. С. **(рецензируемое издание, рекомендованное ВАК РФ)**.
8. Патент РФ № 92815. Устройство для прессования. Заявл. 16.12.2009.
9. Патент РФ № 92816. Устройство для прессования. Заявл. 16.12.2009.