

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

**РУДНЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ**

**А.В. Волокитин, А.Б. Найзабеков, С.Н. Лежнев, И.Е. Волокитина**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ  
УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ  
ПРЕССОВАНИЮ В РАВНОКАНАЛЬНОЙ СТУПЕНЧАТОЙ  
МАТРИЦЕ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ВОЛОЧЕНИЕМ**  
*(монография)*

Рудный  
2019

УДК 669  
ББК 34.3  
И88

*Рецензенты:*

Койнов Т.А. - доктор технических наук, профессор, Университет химической технологии и металлургии г. София;

Куис Д.В. - кандидат технических наук, Белорусский государственный технологический университет;

Панин Е.А. – доктор PhD, Карагандинский государственный индустриальный университет.

**А.В. Волокитин, А.Б. Найзабеков, С.Н. Лежнев, И.Е. Волокитина**

И88 Исследование формирования ультрамелкозернистой структуры и свойств металлических материалов, подвергнутых прессованию в равноканальной ступенчатой матрице с последующим волочением: Монография./ А.В. Волокитин, А.Б. Найзабеков, С.Н. Лежнев и др. – Рудный: РИИ, 2019. – 118 с.

ISBN 978-601-7994-01-3

Настоящая монография предназначена для студентов, магистрантов и докторантов по программе PhD, обучающихся по специальностям «Металлургия», «Машиностроение», «Технология обработки материалов давлением», «Наноматериалы и нанотехнологии». В данной монографии рассмотрены теоретические и технологические основы получения высококачественных проволоки с субультрамелкозернистой структурой из различных черных и цветных металлов и сплавов новым совмещенным процессом «РКУ-прессование - волочение», реализующим в металле интенсивные пластические деформации.

Рекомендовано к изданию Ученым Советом Рудненского индустриального института.

УДК 669  
ББК 34.3

ISBN 978-601-7994-01-3

© МОиН РК  
© РИИ  
© Волокитин А.В.  
© Найзабеков А.Б.  
© Лежнев С.Н.  
© Волокитина И.Е.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>1 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ</b> .....	8
1.1 Дискретные методы получения ультрамелкозернистой структуры в металлических материалах.....	8
1.2 Анализ способов получения длинномерных заготовок методами ИПД.....	13
1.3 Анализ способов непрерывного наноструктурирования проволоки.....	24
1.3.1 Области применения проволоки.....	24
1.3.2 Способы непрерывного наноструктурирования проволоки.....	26
1.4 Совмещенный процесс «прессование-волочение».....	33
Выводы.....	34
<b>2 ТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕЩЕННОГО СПОСОБА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРОВОЛОКИ</b> .....	37
2.1 Анализ возможностей программных комплексов для моделирования методом конечных элементов процессов обработки металлов давлением с учетом неоднородности их структуры.....	37
2.2 Моделирование совмещенного процесса «прессование-волочение».....	38
2.2.1 Исследование эволюции микроструктуры.....	51
2.2.2 Изучение усилий деформирования.....	58
Выводы.....	61
<b>3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	63
3.1 Выбор материалов для исследования.....	63
3.2 Методика проведения исследований.....	65
3.2.1 Подготовка образцов для исследований.....	65
3.2.1.1 Подготовка образцов для изучения микроструктуры.....	65
3.2.1.2 Подготовка образцов для механических исследований.....	66
3.2.2 Металлографический анализ.....	67
3.2.2.1 Растровая электронная микроскопия.....	67
3.2.2.2 Просвечивающая электронная микроскопия.....	68
3.2.2.3 Метод дифракции обратноотраженных электронов.....	69
3.2.3 Механические испытания образцов.....	69
3.2.3.1 Методика измерения твердости.....	69
3.2.3.2 Испытания на одноосное растяжение.....	70
3.2.3.3 Испытания проволоки на перегиб.....	71
Выводы.....	72
<b>4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЕ-ВОЛОЧЕНИЕ</b> .....	74
4.1 Подготовка и проведение эксперимента.....	74
4.2 Разработка и изготовление образцов и оснастки для РКУП-В.....	75
4.2.1 Разработка и изготовление равноканальной ступенчатой матрицы...	75

4.2.2 Изготовление образцов для проведения эксперимента.....	77
4.3 Методика проведения эксперимента.....	77
Выводы.....	80
<b>5 ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ УМЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ В ПРОВОЛОКЕ ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ «ПРЕССОВАНИЕ-ВОЛОЧЕНИЕ».....</b>	<b>81</b>
5.1 Сравнение структуры стальной проволоки и заготовок после обработки различными методами пластической деформации.....	81
5.2 Структура и свойства медной проволоки и заготовок после обработки различными методами пластической деформации.....	89
5.3 Структура и свойства алюминиевой проволоки и заготовок после обработки различными методами пластической деформации.....	95
5.4 Механизм формирования ультрамелкозернистой структуры.....	98
5.5 Оценка соответствия механических свойств проволоки после РКУП-В с требованиями стандартов.....	100
5.6 Разработка рекомендаций по внедрению совмещенного процесса РКУП-В в производство.....	102
Выводы.....	104
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>106</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>108</b>



## ВВЕДЕНИЕ

Для осуществления планов, стоящих перед экономикой Республики Казахстан необходимо обеспечение основных отраслей промышленности качественной металлопродукцией, обладающей уникальными физическими, механическими и другими эксплуатационными свойствами. Часто решение этих задач связано с высокими энергозатратами. В условиях бережливого использования энергетических и сырьевых ресурсов, проблема энерго- и ресурсосберегающих способов получения материалов со свойствами, сочетающими одновременно высокую прочность и пластичность, в условиях использования относительно простых и недорогих устройств, позволяющих затрачивать минимально возможное количество времени при обработке изделий имеет большое практическое значение [1].

На данный момент высокую актуальность приобрели работы, связанные с получением металлоизделий в одной непрерывной линии путем комбинирования и совмещения операций. Такой подход ведет к повышению конкурентоспособности за счет снижения количества промежуточных операций. Для этого необходимо изучить напряженно-деформированное состояние при сложном нагружении, которое возникает при комбинировании нескольких операций в одном очаге деформации [2].

Научной основой для создания новых методов обработки материалов является изучение связи между составом, структурным состоянием и свойствами металлов и сплавов, а так же экспериментальный и теоретический анализ механизмов фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях, в том числе деформационных [3].

Традиционные технологии деформирования, такие как волочение и холодная прокатка также сопровождаются измельчением структуры. Однако, в основном, субструктура имеет ячеистый характер с зернами удлиненными в направлении волочения или прокатки, а также содержит высокую долю малоугловых границ. С другой стороны, материал, полученный интенсивной пластической деформацией (ИПД), содержит зернистую структуру, с относительно мелкими зернами, с высокими углами разориентировки. Данный факт также благоприятно сказывается на динамике рекристаллизации, и таким образом на термостабильности. К тому же, часто ИПД проходит при низких температурах (окружающей среды), что делает ее более привлекательной. Вместе с тем, известно, что их ультрамелкозернистые и наноструктурные состояния с зернами размером менее одного микрона и особым состоянием границ, могут значительно (в 2-3 раза) повысить прочность технически чистых металлов и в 1,5-2 раза сплавов в сочетании с достаточно высокой пластичностью. Наиболее известным способом получения металлов с ультрамелкозернистой структурой является способ РКУП, который в условиях многоциклового обработки обеспечивает формирование ультрамелкозернистой структуры в заготовках с высоким коэффициентом использования металла, что

важно для промышленного использования. Хотя уже и известны некоторые результаты применения методов ИПД в машиностроительной и медицинской промышленности, позволившие снизить затраты на энергетические ресурсы на 20-30%, но широкого применения они не нашли, так как получение такой структуры большинством известных способов трудо- и энергозатратно, а так же, накладывает ограничения на геометрические размеры получаемого продукта, что существенно снижает их производительность [1, с. 44].

Одним из способов качественной обработки металлических заготовок является волочение длинномерной проволоки. Волочение направлено на получение геометрически правильной продукции, с ровной и чистой поверхностью, как правило, малого сечения. Результатом процесса является уменьшение диаметра проволоки и увеличение ее длины. Это актуально для производства проволоки разного профиля и другой проволочной продукции, применяемой во всех областях человеческой деятельности. Но при современной технологии переработки суммарные обжатия при волочении катанки в проволоку достаточно большие (до 99,2%), что требует проведения дополнительных промежуточных термических обработок [4]. Поэтому повышение прочностных и пластических свойств металла без промежуточной термической обработки с сохранением необходимых конечных характеристик проволоки при совершенствовании уже существующих технологий является перспективным направлением развития металлообработки. В последние двадцать пять лет активно развиваются исследования, сосредоточенные на получение ультрамелкозернистых и нанокристаллических материалов с повышенными физико-механическими свойствами, которые являются перспективными конструкционными и функциональными материалами нового поколения. На данный момент существуют целые научные школы, активно развивающие науку в этом направлении, как в России, так и за рубежом. Достаточно перечислить таких авторов, как В.М.Сегал, В.В. Рыбин с сотр., Левит В.И. с сотр., Р.З. Валиев с сотр., Р.Р. Мулюков с сотр., А.М. Глезер с сотр., С.В. Добаткин с сотр., В.Н. Чувильдеев с сотр., В.Н. Варюхин с сотр., Э.В. Козлов, Н. Конева, А.Виноградов, T.G. Langdon, M. Furukawa, M. Nemoto, Z Norita и других, и становится понятным масштаб проводимых исследований. Тем не менее, проблема получения длинномерных объемных наноструктурных материалов в полной мере остается не решенной. Поэтому развитие собственных новейших технологий и освоение новых способов обработки металлов давлением вот основные направления развития промышленности по производству проволоки [5].

Решение таких задач лежит в области создания высокоэффективных технологий с применением современных и передовых методов металлообработки. Поэтому исследования, направленные на решение проблем получения длинномерных материалов со свойствами, сочетающими одновременно высокую прочность и пластичность, в условиях использования относительно простых и недорогих устройств, позволяющих затрачивать

минимально возможное количество времени при производстве изделий являются актуальными [6].

Научная новизна данных исследований заключается в изучении воздействия на зеренную структуру металлов и сплавов, интенсивной пластической деформации, развивающейся в равноканальной угловой ступенчатой матрице при совмещении с классическим волочением, что позволяет реализовать схемы сдвига и растяжения. Формирование объемной ультрамелкозернистой структуры в металлических материалах, обработанных по новой технологии, является более эффективным, чем ранее известные способы получения металла с ультрамелкозернистой структурой. Это позволяет создать новую эффективную технологию получения проволоки с высокими технологическими и эксплуатационными свойствами.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанная совмещенная технология «прессование-волочение» позволит получать высококачественную проволоку с ультрамелкозернистой структурой и высокими механическими свойствами, а это в свою очередь позволит заменить дорогостоящие легированные марки стали обычными конструкционными.

# **1 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ**

В современной промышленности наиболее актуальной проблемой является увеличение физико-механических свойств металлических материалов. Одним из перспективных способов улучшения физико-механических свойств металлических материалов является измельчение элементов зеренно-субзеренной структуры до ультрамелкозернистой (УМЗ) или наноструктуры. Из всех используемых способов получения металлических материалов с субмикроструктурной и нанокристаллической структурами наиболее часто применяются способы интенсивной пластической деформации (ИПД).

## **1.1 Дискретные методы получения ультрамелкозернистой структуры в металлических материалах**

Методы ИПД, в отличие от традиционных методов обработки металлов давлением, направленных преимущественно на формообразование, используют с целью глубокого изменения структуры, фазового состава и физико-механических свойств. В результате интенсивного пластического воздействия в металлических материалах на порядки возрастает протяженность границ зерен и субзерен, заметно изменяется статическая и динамическая дилатация атомов кристаллической решетки. Благодаря этому, во много раз повышаются прочностные характеристики металлов при сохранении достаточно высоких пластических свойств, выгодно изменяется также ряд физических свойств, в том числе таких, которые ранее считались нечувствительными к деформациям [7].

Нанокристаллические материалы, обладающие уникальной структурой и свойствами, в настоящее время привлекают внимание физиков и материаловедов во всем мире, поскольку традиционные методы повышения механических свойств путем легирования и подбора различных способов термомеханической обработки уже не могут обеспечить растущие запросы различных отраслей промышленности. Очевидно, что одним из перспективных направлений является переход к наноразмерной дисперсности компонентов и элементов структур металлов и сплавов, и объемные субмикроструктурные и наноструктурные материалы находят все более широкое применение.

Особенностью рассматриваемых ниже методов является деформационная природа механизмов измельчения структуры. Поскольку для разных по природе материалов приемы наноструктурирования имеют свои особенности, то ниже описываются основные дискретные методы [8].

Интенсивная пластическая деформация кручением под высоким давлением (КВД). Идея применения деформации кручением под высоким гидростатическим давлением и создания соответствующей аппаратуры была реализована Бриджменом П.У [9]. Это метод, при котором образец, обычно

имеющий форму диска диаметром 10-20 и толщиной 0,3-1,0 мм, подвергается деформации кручением в условиях высокого приложенного гидростатического давления. Образец помещается внутрь полости, выполненной в нижнем бойке, и к нему прилагается гидростатическое давление (Р) величиной до 7 ГПа. Пластическая деформация кручением образца осуществляется за счет вращения одного из бойков (рисунок 1.1) [9, с. 252].

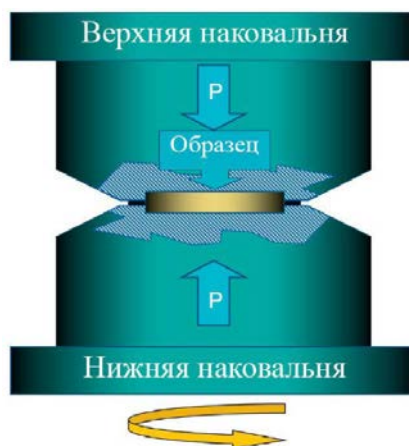


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема метода КВД

При кручении работа внешних сил, необходимая для деформации до разрушения различных материалов, и отнесенная к единице массы деформируемого материала, в 3-5 раз выше, чем при растяжении. Возможность диссипировать больше энергии при кручении, чем при растяжении, объясняется двумя факторами [10].

Первый состоит в том, что при кручении реализуется схема деформации по типу простого сдвига, для которой характерно изменение угла между постоянным направлением действия максимальных касательных напряжений и направлением наибольшего удлинения. В случае растяжения этот угол остается постоянным, что не способствует активации новых систем скольжения.

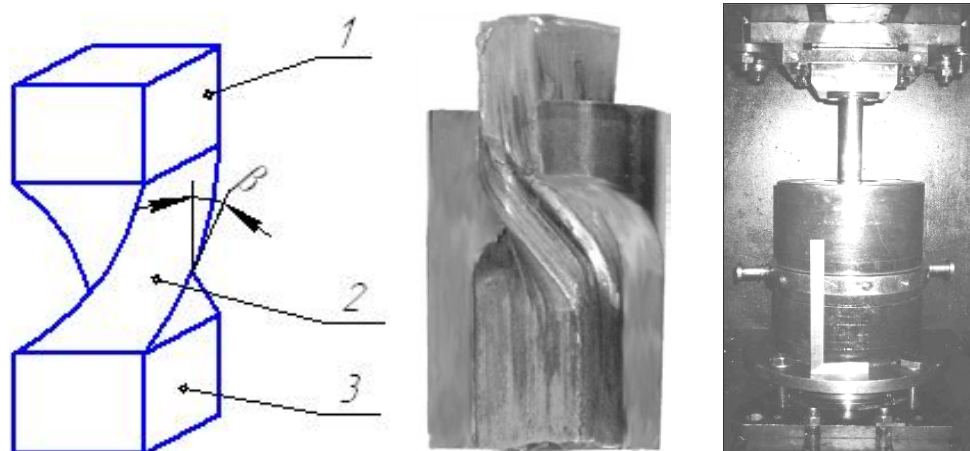
Второй фактор заключается в том, что диссипация энергии деформации при кручении идет по пути генерации, перераспределения, накопления и аннигиляции дефектов кристаллического строения материала.

Поэтому для получения накопленной степени деформации  $\epsilon = 17...18$  процессом РКУП требуется 16 проходов, а кручением под давлением достаточно 0,5.. .1 оборота [11].

Однако перспективы использования КВД, как промышленного метода, имеют существенные ограничения, обусловленные, прежде всего, малыми размерами обрабатываемых заготовок и низкой стойкостью инструмента вследствие чрезвычайно высоких нагрузок на него [12].

Метод винтовой экструзии (ВЭ), предложенный в работе [13], отличается от известных методов напряженно-деформированным состоянием в образце, а также технологическими возможностями применения (рисунок 1.2) [13, с. 32,67]. ВЭ позволяет аккумулировать большие деформации в металлах, заметно

измельчать их микроструктуру и может быть реализована в установках гидроэкструзии для получения прецизионных длинномерных профилей разной формы (прутки, трубы, сверла и др.). Однако она может приводить к появлению сильной нежелательной анизотропии.



1 – заходной канал; 2 – винтовой; 3 – калибрующий

Рисунок 1.2 – Схема канала матрицы для ВЭ

Суть ВЭ заключается в том, что призматическую заготовку продавливают через винтовую матрицу (рисунок 1.2), канал которой состоит из трех участков: заходного 1, винтового 2 и калибрующего 3. Геометрические параметры поперечных сечений всех участков одинаковы. Характеристикой винтового участка 2 является угол  $\beta$  наклона винтовой линии, наиболее удаленной от оси матрицы, к оси экструзии [13, с. 31].

Благодаря указанным особенностям геометрии канала при продавливании через него заготовки ее форма не изменяется, что позволяет осуществлять многократную экструзию заготовки с целью накопления интенсивных деформаций. При этом происходит изменение ее структуры и свойств при сохранении идентичности начальной и конечной формы. Геометрические параметры поперечных сечений всех участков одинаковы. Благодаря указанным особенностям геометрии канала при продавливании через него заготовки ее форма не изменяется, что позволяет осуществлять многократную экструзию заготовки с целью накопления интенсивных деформаций. При этом происходит изменение ее структуры и свойств при сохранении идентичности начальной и конечной формы. Минимальной деформации подвергается волокно, расположенное по оси образца, максимальной – наиболее удаленные от оси волокна [14].

В настоящее время наиболее широко используемым методом ИПД является равноканальное угловое прессование (РКУП) [15-19]. Как показано на рисунке 1.3 [15, с. 135], образец, имеющий форму прутка круглого или квадратного сечения, прессуется в матрице через сопрягающиеся под определенным углом каналы.

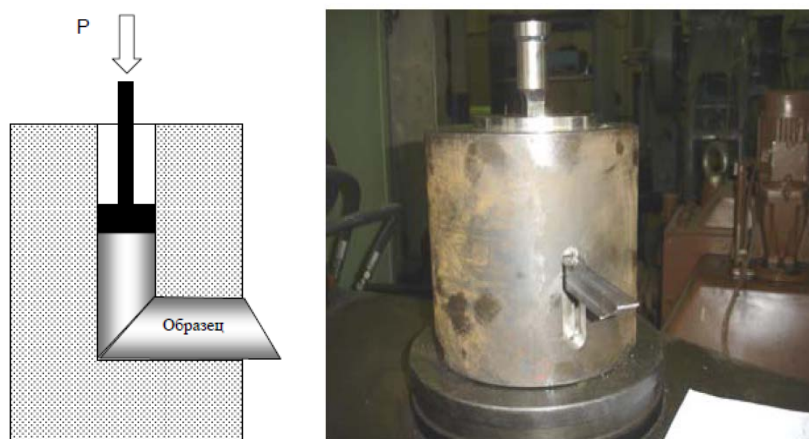


Рисунок 1.3 – Схема равноканального углового прессования

Деформация сдвигом происходит, когда заготовка проходит через зону их пересечения, т. к. размеры заготовки в поперечном сечении не изменяются, прессование может производиться многократно с целью достижения исключительно высоких степеней деформации.

Метод РКУП характеризуется большим количеством параметров, определяющих качество, структуру и свойства получаемых образцов. К таким параметрам относятся исходное структурное состояние материала, угол  $\phi$ , температура, скорость и степень деформации, а также маршрут прессования.

Для более эффективного получения длинномерных полуфабрикатов с УМЗ структурой разработан модифицированный метод РКУП в параллельных каналах (рисунок 1.4) [20], позволяющий получать необходимую проработку структуры за меньшее количество проходов, а также, путем последовательного прессования заготовок, добиться определенной непрерывности процесса [20, с. 17; 21; 22]. Отличительной особенностью РКУ прессования с параллельными каналами является одновременная реализация сдвиговой деформации в двух очагах, соответствующих двум последовательным пересечениям каналов в оснастке. В результате может существенно уменьшиться число проходов, необходимое для обеспечения формирования УМЗ структуры.

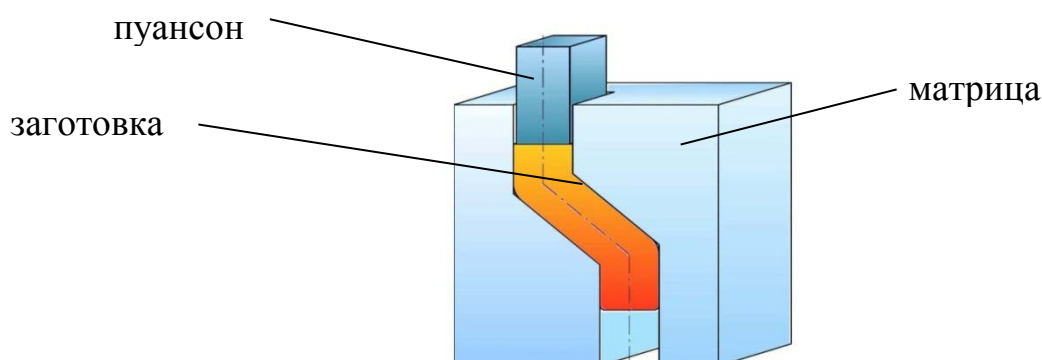


Рисунок 1.4 – Равноканальная ступенчатая матрица для прессования



Одним из эффективных технологических элементов для РКУП хрупких материалов является противодействие, которое способствует получению цельных, без трещин заготовок и повышению механических свойств [23].

Впервые оно было применено для алюминиевых сплавов с использованием горизонтальной оснастки (рисунок 1.4) [25]. Отметим, что метод РКУП не ограничивается его применением в лабораторных исследованиях. Примеры разработки технологий получения разнообразных полуфабрикатов на основе метода РКУП подробно представлены в работе [24].

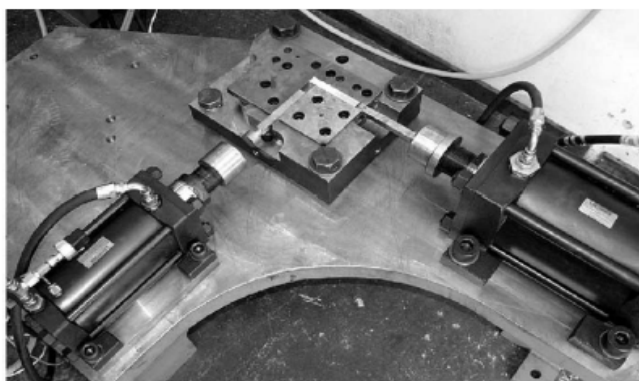


Рисунок 1.5 – РКУП оснастка с контролируемым противодействием

Открытая всесторонняя (многопереходная) изотермическая ковка (ВИК) широко исследовалась в ИПСМ РАН [26-27] и активно предлагается авторами как один из основных и эффективных методов наноструктурирования массивных заготовок. Принцип метода заключается в многократной деформации заготовки с изменением оси нагружения на каждом переходе (рисунок 1.6) [26, с. 435].

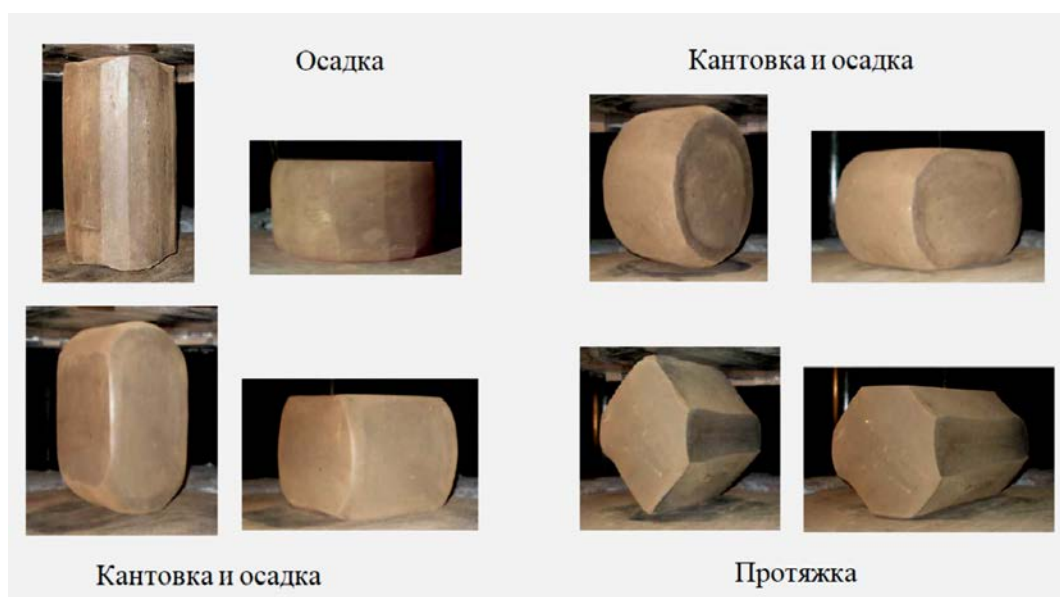


Рисунок 1.6 – Схема выполнения одного этапа открытойковки



При этом измельчение структуры обрабатываемого материала достигается не только за счет аккумуляции ее изменений с накоплением деформации, но также и за счет того, что используется принцип поэтапного уменьшения размера зерен при поэтапном снижении температуры деформации, проводимой в изотермических условиях. Для достижения результата на каждом этапековки должно обеспечиваться измельчение зерен обрабатываемого материала за счет прохождения фрагментации и/или непрерывной динамической рекристаллизации [28, 29]. Формирование же все более мелких зерен, в свою очередь, повышает технологическую пластичность материала и обеспечивает возможность его дальнейшего деформирования без разрушения при более низких температурах [30].

Методом ВИК получена ультрамелкая и наноструктура в заготовках весом более 50 кг из титана и его сплавов, сталей, никелевых сплавов и интерметаллидов [31]. Для этих же целей и по тому же принципу в [32] А. Гошем была предложена закрытая многопереходная ковка. В этом процессе заготовка также последовательно деформируется по двум или трем осям.

Неоспоримым преимуществом обеих ковок является их простота и отсутствие необходимости использования специального дорогостоящего инструмента. Даже в закрытой схеме инструмент очень прост и дешев. Кроме того, этот процесс легко механизировать. Однако есть один непреодолимый недостаток – ограничение степени однократной деформации из-за потери устойчивости заготовки при осадке. Кроме того, осадке присуща зональная неоднородность деформации заготовки, приводящая к неоднородности ее деформационной структуры. Устранение последней требует большого числа циклов и этапов обработки [30, с. 38].

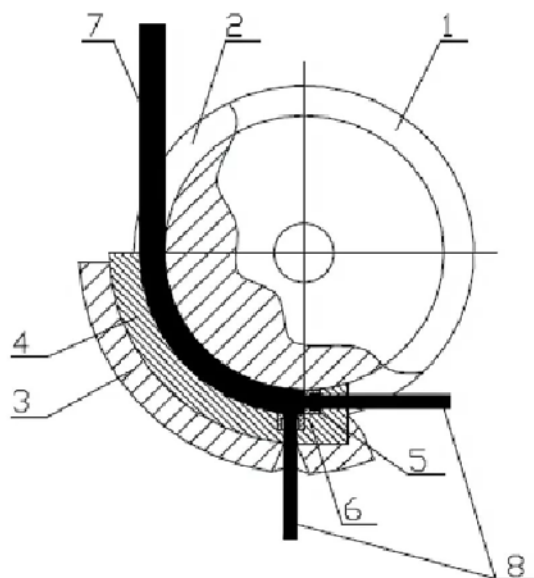
Все перечисленные методы ИПД имеют дискретный характер, что не позволяет использовать их в непрерывных процессах.

## **1.2 Анализ способов получения длинномерных заготовок методами ИПД**

Использование методов интенсивной пластической деформации, таких как КВД, РКУП, многосторонняя ковка, винтовая экструзия приводит к измельчению структуры сплавов, однако они не применимы для получения длинномерных ультрамелкозернистых заготовок. Результатом приближения процессов ИПД к условиям промышленного производства стали непрерывные методы ИПД.

Метод Conform (рисунок 1.7) [33] разработан в 1971 г. в Англии и представляет собой разновидность непрерывного прессования. Принцип обработки материалов по схеме conform показана на рисунке 1.7. Конформ основан на непрерывной деформации заготовки путем подачи ее силами активного трения в рабочий канал, образованный башмаком и подвижным вращающимся колесом с ручьем в виде канавки по периферии, при этом в торце башмака установлена матрица, которая формирует распрессовочную

камеру. На рисунке 1.7 показана деформация заготовки 7, которая подается в ручей 2 в виде кольцевой канавки 3 на колесе 1. Кольцевая канавка 3 с внешней стороны прижимается башмаком 4, в котором закреплен блок инструмента с прессовыми матрицами 5. В данном методе непрерывное прессование происходит за счет сил активного трения между рабочим колесом 1 и заготовкой 7. Выдавливание может происходить не только в направлении вращения рабочего колеса, но и в направлениях, перпендикулярных оси рабочего колеса, в том числе и радиальном [33].



1 – рабочее колесо; 2 – рабочие валки; 3 – кольцевая канавка; 4 – башмак с упором; 5 – матрицы; 6 – кольцевая канавка; 7 – заготовка; 8 – изделие

Рисунок 1.7 – Схема непрерывного прессования Conform

Стоит отметить, что традиционный способ Конформ характеризуется высокой энергоемкостью и повышенной неравномерностью деформации. Новым направлением развития метода стала его разработка как метода интенсивного пластического деформирования для получения длиномерных изделий с ультрамелкозернистой структурой [33].

За последние годы было разработано большое количество схем типа Conform [34].

Conform™. Использование единственного вращающегося диска в качестве движущей силы процесса выдавливания позволяет производить продукцию неограниченной длины. В диске самой простой конструкции имеется периферийное углубление, при помощи которого поступающее сырье передается на опрессовку.

Камера, в которой находится рабочий материал, поддерживается колодкой. В камере также находится выступ, контактирующий с канавкой диска. Сила вращающегося диска заставляет находящееся около выступа сырье поступать в

камеру, откуда оно затем вытесняется. Помимо обычно используемых прутьев в качестве сырья могут использоваться материалы любой морфологии при условии, что размеры соответствуют размеру канавки (рисунок 1.8) [34].

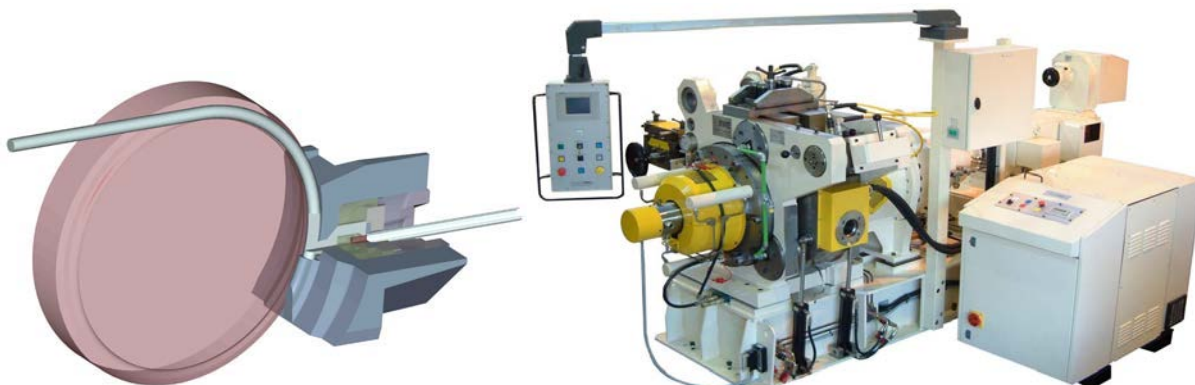


Рисунок 1.8 – Процесс Conform 350i

В машинах новой серии машин Conform «i» компании BWE используется запатентованная индукционная система нагрева, которая обеспечивает эффективный прямой нагрев зон вытеснения. Возможность быстрого предварительного разогрева камеры до нужного уровня температуры вытеснения перед непосредственным запуском машины уменьшает нагрузку на инструментную часть и позволяет работать с более сложной для вытеснения продукцией [34].

Процесс Conform используется для производства широкого спектра продукции из цветных металлов, включая алюминиевые и медные сплавы, цинк, кальций, свинец и магний (рисунок 1.9) [34].



Рисунок 1.9 – Продукция процесса Conform 350i

Геометрия процесса Conklad спроектирована таким образом, чтобы сердцевина материала попадала в зону вытеснения. Для обеспечения потока металла с обеих сторон камеры в машину подается два прута сырья, что позволяет сбалансировать:

- прямое нанесение оболочки – нанесение покрытия непосредственно на сердцевину обрабатываемого материала;

- прямое нанесение оболочки под высоким давлением – обработка сердцевины материала под максимальным давлением вытеснения для создания связи металлов. В данном случае перед подачей материала на машину Conklad сердцевина проходит этап предварительного нагрева (рисунок 1.10) [34];

- не прямое нанесение оболочки или обмотка используется в случаях, когда сердцевина чрезвычайно хрупкая или чувствительная к высоким температурам. В таких случаях изготавливается обмотка большего размера, которая затем наносится непосредственно на сердцевину.

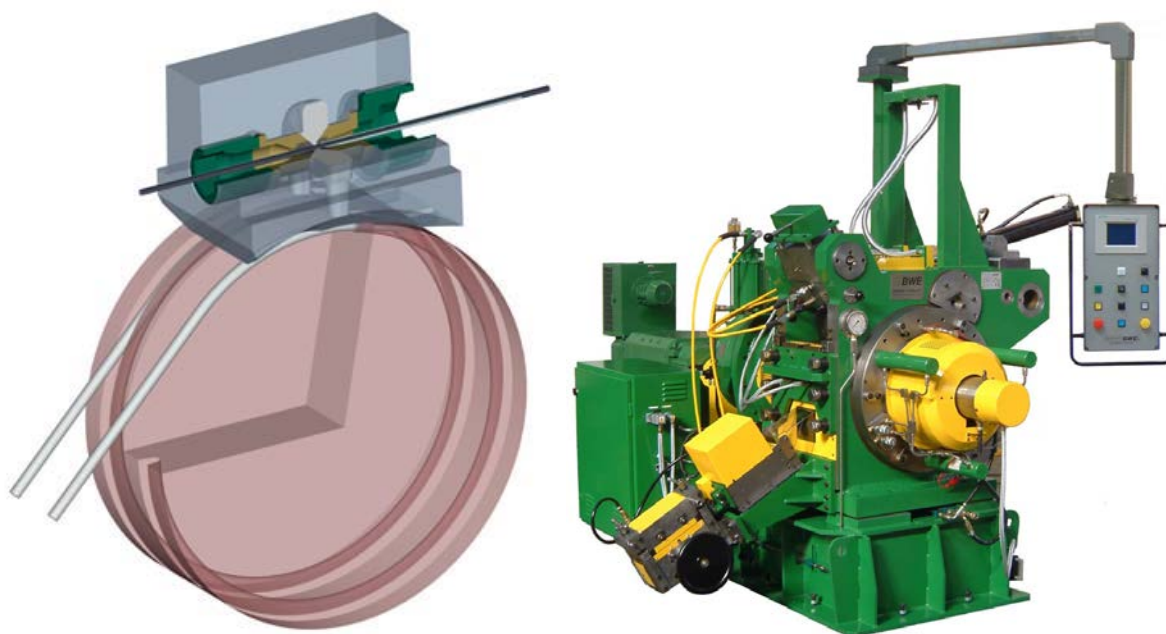


Рисунок 1.10 – Процесс Conklad

Процесс Conklad используется для изготовления проводов с покрытием, труб и кабелей в оболочке (рисунок 1.11) [34].

В процессе Conklad низ прессовочной камеры нагревается диском, а верхняя часть охлаждается колодкой, обеспечивающей силу закрытия. Хотя нагрев идет сбоку, разница между температурой в верхней и нижней частях оказывает влияние на подаваемый металл. При увеличении размера оболочки необходимо увеличить разницу между температурами, а при работе с материалами диаметром приблизительно 50 мм, равномерность слоя контролировать практически невозможно [34].

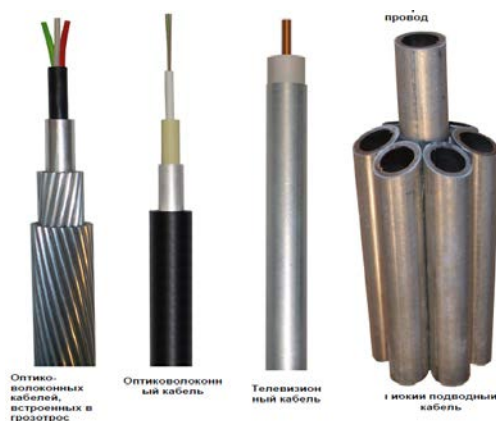


Рисунок 1.11 – Продукция процесса Conform 350i

Запатентованный процесс SheathEx (рисунок 1.12) является самой последней инновационной разработкой BWE.

Металлическая обмотка используется для защиты кабелей от влияния влаги без уменьшения их гибкости. Проникновение влаги оказывает негативное влияние на целостность изоляции. Влага в сочетании с высокой электрической нагрузкой приводит к развитию водного триинга, что приводит к преждевременному выводу кабеля из строя [34].

Эффективность использования алюминиевой обмотки подтверждена экономически, кроме того, такая продукция обладает лучшими механическими свойствами по сравнению с продукцией в свинцовой обмотке. После формовки алюминиевую обмотку можно сжимать, как при использовании процесса SheathEx.

Процесс SheathEx, используемый для нанесения бесшовной алюминиевой оболочки на кабели питания среднего и большого размера, напрямую связан в недавно представленной технологией индукционного нагрева.

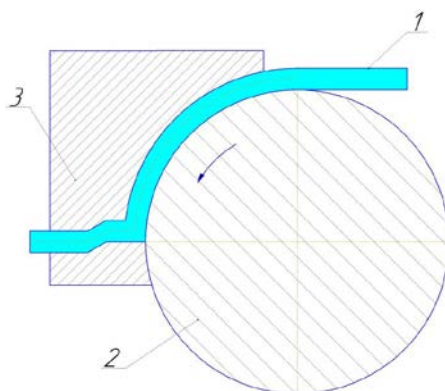


Рисунок 1.12 – Процесс SheathEx



Такие процессы, как РКУП-Конформ позволяют получать длинномерные полуфабрикаты (проволока, катанка, прутки) с УМЗ структурой и имеют высокий коэффициент использования металла. Однако данные методы имеют недостаток, связанный с многоцикловостью обработки и с тем, что для получения высокого комплекса свойств в металлических материалах, как правило, требуется проведение 3-8 циклов прессования одной заготовки. Для решения данной проблемы авторами [33, с. 35] разработан новый метод ИПД – Мульти-РКУП-Конформ (Мульти-РКУП-К), обеспечивающий высокий уровень накопленной деформации за один цикл обработки и интенсивное измельчение исходной структуры.

Процесс реализуется следующим образом (рисунок 1.13): заготовка 1 подается на вход рабочего канала, образованный прямоугольной гравюрой вращающегося рабочего колеса 2 и неподвижным прижимом 3. Посредством вращения колеса 2 и возникающих активных сил трения между гравюрой колеса 2 и заготовкой 1 обеспечивается сила прессования, приводящая к продвижению заготовки 1 через рабочий канал. Рабочий канал в выходной части имеет два ступенчатых перегиба, что обеспечивает последовательную трехкратную деформацию сдвигом заготовки 1 в условиях непрерывной обработки [33, с. 36].

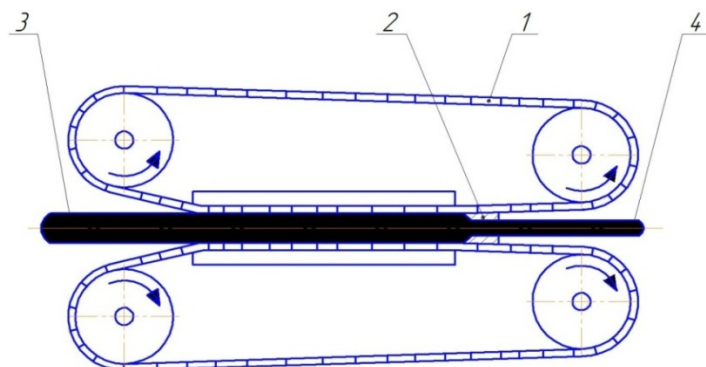


1 – заготовка; 2 – рабочее колесо; 3 – прижим

Рисунок 1.13 – Схема Мульти-РКУП-К

Одним из методов получения длинномерных заготовок является Лайнекс, который предложен специалистами фирмы «Western Electric Co» (США). Непрерывное прессование происходит за счет сил активного трения, возникающих между плоскими поверхностями звеньев цепей и верхней и нижней плоскостями заготовки, имеющей прямоугольное поперечное сечение. Величина давления прессования зависит от разности сил трения на смазанных и несмазанных плоскостях заготовки. Этот способ применяется для производства алюминиевых шин и проволоки на заводах фирмы «Vencuck» (США). Максимальная величина коэффициента вытяжки на порядок меньше, чем при

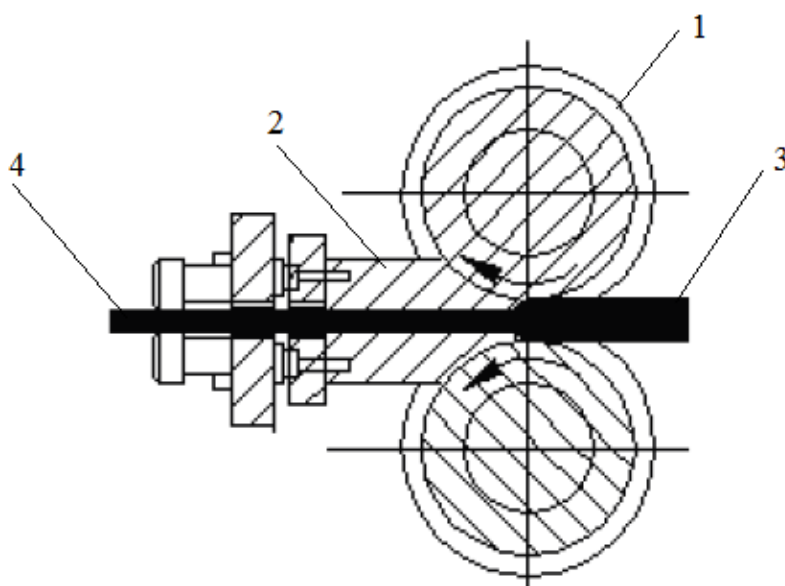
реализации способа Конформ, что и является основным недостатком данного процесса. Схема данного способа приведена на рисунке 1.14 [35].



1 – приводные цепи; 2 – матрица; 3 – заготовка; 4 – изделие

Рисунок 1.14 – Схема процесса непрерывного прессования способом Лайнекс

Процесс Экстроллинг был предложен в 1975 г., запатентован Б. Авитцуром в 1976 г. [36-37]. Этот способ совмещает прокатку и прессование в одном очаге деформации. Главное отличие данного способа от Конформ состоит в более эффективном заполнении полости калибра металлом заготовки и меньших потерях мощности на трение реактивного действия. Недостатком процесса является небольшое единичное обжатие и ограниченная длина получаемого изделия. Этот способ не нашел промышленного применения, так как не обеспечивает устойчивого течения металла и создания необходимых для выдавливания металла давлений. Схема процесса показана на рисунке 1.15 [36].



1 – рабочие валки; 2 – матрица; 3 – заготовка; 4 – изделие

Рисунок 1.15 – Схема устройства для процесса Экстроллинг

Для осуществления процесса исходная заготовка непрерывно задается в калибр, обжимается в нем, что полностью соответствует стадии прокатки и выдавливается в калибрующее отверстие матрицы, установленной на выходе из калибра.

Данный способ реализуется как в холодном состоянии, так и при повышенных температурах и имеет меньшие потери мощности на трение реактивного действия, а также более эффективное заполнение полости калибра металлом заготовки. Рассматриваемый процесс сочетает в себе низкие потери на трение и малую продолжительность обработки, характерные для прокатки, и большие степени деформации, возможные при прессовании. Недостатки прокатки (небольшое единичное обжатие) и прессования (ограниченная длина получаемого изделия) при такой реализации процесса могут быть устранены. Однако способ не нашел должного применения в промышленности, так как предложенное техническое решение (использование открытого калибра, расположение матрицы на общей вертикальной оси валков и т. д.) не обеспечивало устойчивого протекания процесса и создания необходимых для экструдирования металла давлений [38].

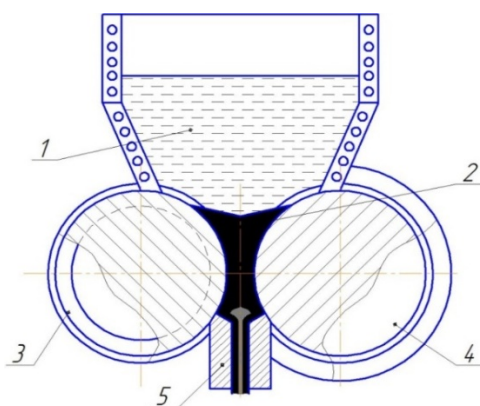
Процесс Экстроллинг был модернизирован и получил развитие в виде метода совмещенной прокатки и прессования (СПП). Способ основан на деформации длинномерной заготовки прямоугольного поперечного сечения в двухвалковом закрытом калибре, перекрытом на выходе матрицей [33, с.29].

Суть предлагаемого способа деформирования заключается в следующем. Предварительно нагретая до температуры начала деформирования заготовка подается к прокатным валкам, которые за счет сил контактного трения захватывают её в зев валков, а на выходе из него проталкивают через каналы равноканальной ступенчатой матрицы. После того, как заготовка полностью выйдет из зева валков, к ним подается следующая заготовка, которая, пройдя через валки и попав в матрицу, выталкивает ранее продеформированную заготовку из матрицы. То есть в данном случае процесс прессования заготовок в равноканальной ступенчатой матрице реализуется за счет использования контактных сил трения, возникающих на поверхности контакта металла с вращающимися валками [39].

В работе Avitzur (1974) [40] показано, что после обработки методом СПП в алюминиевых полуфабрикатах формируется рекристаллизованная дисперсная структура. Недостатком данного способа является то, что при его реализации формируется высокая неоднородность деформированного состояния в очаге деформации и, соответственно, неоднородность свойств конечного продукта. В очаге деформации формируются застойные зоны, что, как известно, приводит к повышению силы прессования и, следовательно, увеличению энергозатрат.

На рисунке 1.16 представлен процесс совмещенного литья и прокатки-прессования (СЛИПП)-ИПД [41].



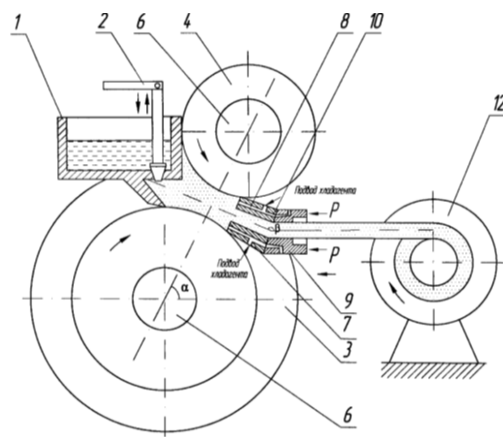


1 – печь-миксер; 2 – расплавленный металл; 3, 4 – валки; 5 – матрица

Рисунок 1.16 – Процесс (СЛИПП)-ИПД

Основной особенностью данной разработки является использование разновидности метода РКУП в параллельных каналах, приводящего к значительному изменению схемы деформации на этапе прессования по сравнению с известным процессом СЛИПП [42]. Расплавленный металл 2 заливают в печь-миксер 1, при этом начинается его кристаллизация на поверхностях валков 3 и 4. Далее закристаллизовавшийся металл захватывают валки 3 и 4, прокатывают, распрессовывают и деформируют в канале матрицы 5 за четыре последовательных непрерывных этапа. На первом этапе осуществляют прямое прессование с истинной степенью деформации  $\epsilon \geq 1,6$ . На втором и третьем этапах производят угловое прессование, что приводит, как правило, к повышению однородности структуры металла. И на четвертом этапе осуществляют калибрующую операцию прямым прессованием через круглую калибрующую часть канала матрицы 5 [41, с. 3].

Недостатком данного устройства и метода является то, что контактная с прессуемым материалом поверхность матрицы выполнена плоской, что приводит к повышению сил прессования и возникновению застойных зон в очаге деформации. В этой связи данный метод имеет ограниченные функциональные возможности, обусловленные тем, что он не обеспечивает однородное деформированное состояние и структуру изделий и, следовательно, не обеспечивает однородные механические свойства. С целью устранения вышеуказанных недостатков разработано устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования алюминиевых сплавов с применением метода ИПД [43]. Данное устройство включает печь-миксер 1 с регулятором 2 подачи расплава в калибр валков, валок 3 с ручьем и валок 4 с выступом, расположенные в станине 5, имеющие полости 6 для охлаждения и образующие закрытый калибр, перекрытый на выходе форкамерой 7 с охлаждающими каналами 8 и матрицей 9 с клиновидными полостями для охлаждения 10. Для поджима матрицы и форкамеры к валкам имеется гидравлический прижим 11, а для смотки готового пресс-изделия в бухту – моталка 12 (рисунок 1.17) [43, с. 3].



1 – печь-миксер; 2 – регулятор; 3 – валок с ручьем; 4 – валок с выступом; 6 – полости для охлаждения; 7 – форкамера; 8 – охлаждающие каналы; 9 – матрица; 10 – клиновидные полости для охлаждения; 12 – моталка

Рисунок 1.17 – Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования

Созданные предпосылки дали возможность дальнейшего развития совмещенных процессов. К примеру, учеными Соединенных Штатов Америки [44] предложен новый способ реализации сдвигового механизма деформации длинномерных заготовок через равноканальную угловую матрицу. Принципиальная схема непрерывного РКУП изображена на рисунке 1.18 [43, с. 9].

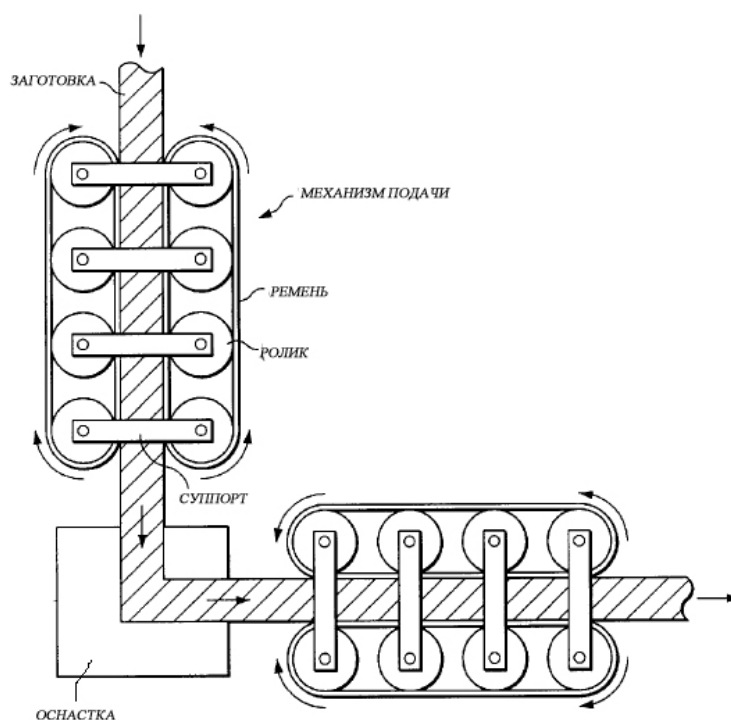


Рисунок 1.18 – Схема непрерывного РКУП

На кафедре «ОМД» Карагандинского государственного индустриального университета был разработан и предложен новый совмещенный способ прокатки и прессования в равноканальной ступенчатой матрице (рисунок 1.19), который по сравнению с обычным прессованием в равноканальной ступенчатой матрице снимает ограничения по размерам исходных заготовок [45-47]. Данный процесс «прокатка-прессование» реализуется за счет использования резервных сил трения, возникающих на поверхности контакта металла с вращающимися валками.

Суть предлагаемого способа деформирования заключается в следующем. Предварительно нагретая до температуры начала деформирования заготовка подается к прокатным валкам, которые за счет сил контактного трения захватывают её в зев валков, а на выходе из него проталкивают через каналы равноканальной ступенчатой матрицы. После того, как заготовка полностью выйдет из зева валков, к ним подается следующая заготовка, которая, пройдя через валки и попав в матрицу, выталкивает ранее продеформированную заготовку из матрицы. То есть в данном случае процесс прессования заготовок в равноканальной ступенчатой матрице реализуется за счет использования контактных сил трения, возникающих на поверхности контакта металла с вращающимися валками. Недостатком данного процесса, является то, что заготовка находится в нагретом состоянии, что усложняет технологию и требует постоянного контроля температуры. Что не совсем подходит для массово выпускаемой продукции [48].

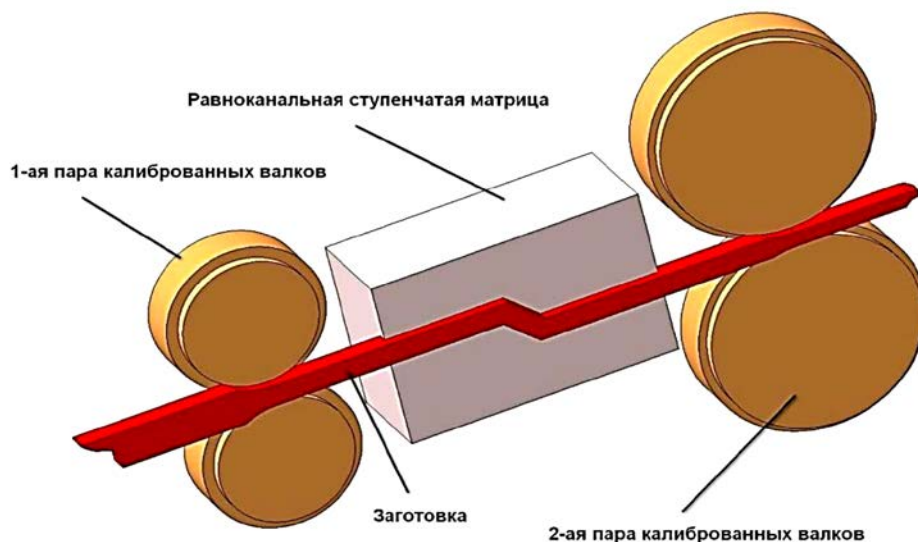
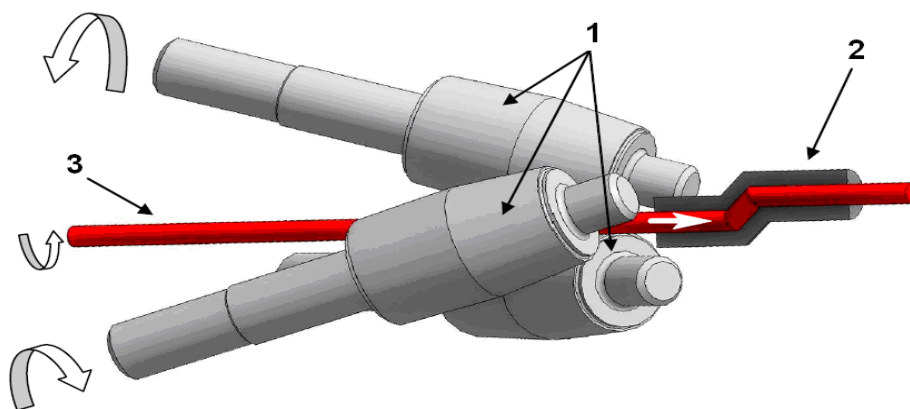


Рисунок 1.19 – Совмещенный способ прокатки и РКУ-прессования

В том же университете был предложен еще один способ деформирования заготовок – совмещенный процесс «винтовая прокатка – прессование» с использованием равноканальной ступенчатой матрицы (рисунок 1.20) [49-50], который позволяет получать заготовки круглого поперечного сечения, металл которых будет иметь ультрамелкозернистую структуру.



1 – заготовка; 2 – валковый узел; 3 – равноканальная ступенчатая матрица;  
 $d_0$  – диаметр заготовки;  $d_1$  – диаметр готовой продукции;  
 $l_2$  – длина наклонного канала матрицы;  $2\theta$  – угол пересечения каналов матрицы;  
 $\alpha$  – угол подачи;  $\beta$  – угол раскатки

Рисунок 1.20 – Совмещенный процесс «винтовая прокатка – прессование»

Суть предлагаемого способа деформирования заключается в следующем. Предварительно нагретая до температуры начала деформирования заготовка подается к прокатным валкам, которая за счет сил контактного трения захватывают ее в валки, а на выходе из них проталкивают через каналы равноканальной ступенчатой матрицы. После того, как заготовка полностью выйдет из валков, к ним подается следующая заготовка, которая, пройдя через валки и попав в матрицу, выталкивает ранее продеформированную заготовку из матрицы. В данном случае процесс прессования заготовок в равноканальной ступенчатой матрице, так же как и при ранее приведенном совмещенном процессе реализуется за счет использования контактных сил трения, возникающих на поверхности контакта металла с вращающимися валками [51].

Однако данный способ также имеет недостатки, заключающиеся в ограничении длины деформируемой заготовки, которая не может превышать 5-7 м.

### 1.3 Анализ способов непрерывного наноструктурирования проволоки

#### 1.3.1 Области применения проволоки

Проволока представляет собой длинномерное изделие из металла, которое имеет форму нити или шнура. Обычно у проволоки круглое сечение, но встречается также сечение в виде квадрата, шестиугольника, трапеции и овала. Минимальная толщина проволоки может быть десятые доли миллиметра, а максимальная толщина – до нескольких сантиметров [52].

Так как проволока считается метизным изделием, то ее производят почти все метизные заводы в больших количествах. На данный момент применение

проволоки можно обнаружить в любой области – в хозяйстве и быту, в строительстве и промышленности.

В производстве проволоки применяют самые разные металлы и сплавы. Чаще всего проволоку делают из стали, чугуна, меди, титана, алюминия и цинка.

Медная проволока применяется в электроэнергетике, строительстве, полиграфии, машиностроении и легкой промышленности. Из нее делают контактные провода, кабеля, заклепки, декоративные элементы и низкотемпературные пары. В обувной промышленности из нее изготавливают мелкие медные гвозди, фурнитуру и шпильки. А в таких отраслях, как машиностроение, телекоммуникации и судостроение, она является незаменимой. Здесь ее используют в качестве обмоток для электродвигателей и трансформаторов, из нее делают выводы искрового зажигания и плавкие предохранители. При этом работать с ней легко, так как она обладает высокой пластичностью. Еще сопротивление медной проволоки меньше, чем изготовленной из алюминия, к тому же она прочнее. Поэтому из нее выгоднее делать электропровода, так как для тех же напряжения и силы тока требуется более легкая и тонкая проволока [53].

Стальную проволоку широко используют для изготовления ограждений, сетки рабицы, сварных сеток, электродов, гвоздей и пружин. Она незаменимый элемент в канатах и тросах, реостатах, электропроводах и в разных нагревательных приборах. К тому же она находит широкое применение для укрепления конструкций из железобетона в качестве арматуры (включая металлокордом) [54].

Алюминиевая проволока является одним из самых востребованных видов изделий из алюминия. Изделия из алюминиевой проволоки используют в пищевой, мебельной промышленности, приборостроении, машиностроении, в строительстве при проведении сварочных работ, для прокладки кабелей электролиний, электротехнических систем в строительстве, а также для организации грозозащиты. В пищевой промышленности, использование алюминиевой проволоки для изготовления кухонных принадлежностей и посуды возможно благодаря низкой химической активности и достаточно высоким антикоррозийным свойствам [55].

Одной из наиболее крупнейших отраслей промышленности использующих проволоку является электроэнергетика. Для передачи электроэнергии на дальние расстояния используются высоковольтные линии электропередач мощностью 220 кВ и выше. Общая протяженность линий электропередач данного класса составляет 20,2 тыс. км, а в целом в Казахстане эксплуатируется 336,2 тыс. км линий электропередач различной мощности [56]. В настоящее время провода для высоковольтных линий электропередач и самонесущие изолированные провода производят преимущественно из алюминия и сплавов на его основе. Данные сплавы обладают высокой электропроводимостью, но низкой прочностью и термостойкостью, поэтому они используются в сочетании

со стальным сердечником, что утяжеляет провода и снижает их пропускную способность [33, с. 5].

В этой связи важной характеристикой проводов становится повышенный уровень прочности и электропроводимости, что дает возможность создавать провода без стального сердечника и увеличить пропускную способность линий электропередач [57].

Из всего выше сказанного можно сделать вывод о том, что проволока – важный и незаменимый продукт металлургической промышленности. И очень часто требуется, чтобы данная проволока обладала высокими механическими и эксплуатационными свойствами, которые можно добиться измельчением зерна до ультрамелкозернистого размера. Поэтому совершенствование технологии с улучшением уже известных способов волочения является актуальной задачей.

### 1.3.2 Способы непрерывного наноструктурирования проволоки

Проволока из различных металлов и сплавов занимает существенное место в общей структуре производства металлопроката. Однако существующие на сегодня производственные мощности не в состоянии удовлетворить возможный рост внутреннего спроса на проволоку. Поэтому развитие собственных мощностей, применение новейших технологий обработки, освоение новых способов обработки металлов давлением вот основные направления развития промышленности по производству проволоки.

Традиционные технологии деформирования, такие как волочение и холодная прокатка, сопровождаются измельчением структуры. Однако в основном субструктура имеет ячеистый характер с зернами, удлиненными в направлении волочения или прокатки, а также содержит высокую долю малоугловых границ.

Уделяя большее внимание процессу волочения как одному из базовых непрерывных методов ОМД получения проволоки, можно утверждать, что на данный момент имеет место усложнение классического способа волочения путем комбинирования с другими воздействиями на металл или расширения диапазонов технологических режимов волочения [2, с.33].

Разноименная схема напряженного состояния металла в деформационной зоне при волочении, характеризуемая одним растягивающим и двумя сжимающими главными напряжениями, создает условия, при которых пластичность протягиваемого металла значительно ниже по сравнению почти со всеми процессами обработки давлением, за исключением растяжения. Это обстоятельство обуславливает сравнительно низкие единичные деформации за переход. Коэффициенты вытяжки при волочении редко превышают значение 1,5. Для восстановления пластичности приходится применять более частые промежуточные термообработки, чем в других процессах ОМД [2, с. 34].

На основе комбинирования был разработан способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением со знакопеременным

изгибом с кручением, на который был получен патент № 2467816 RU [58]. Принципиальная схема непрерывного метода представлена на рисунке 1.21.

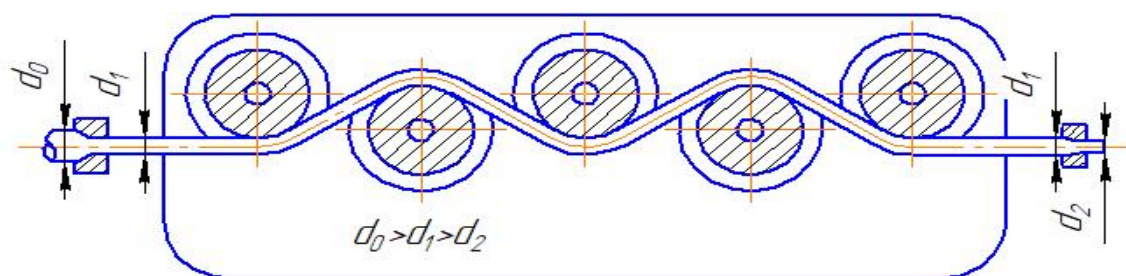
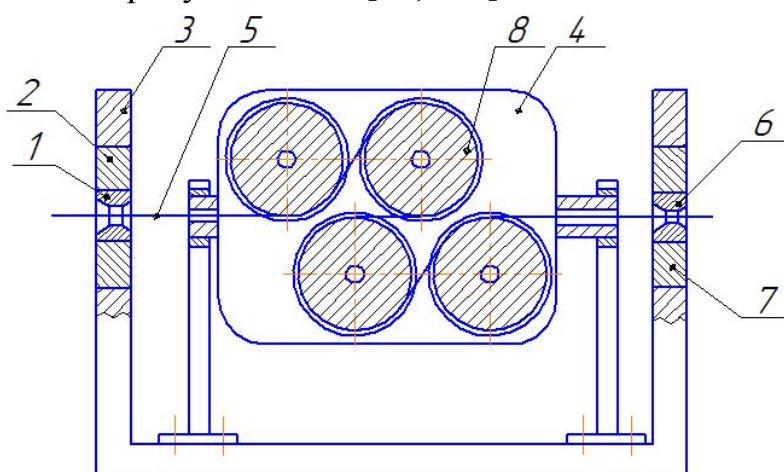


Рисунок 1.21 – Схема изготовления проволоки обработкой волочением со знакопеременным изгибом с кручением

В соответствии с представленной схемой стальная проволока с начальным диаметром  $d_0$  заправляется в первую по ходу ее движения неподвижно закрепленную коническую волоку и далее направляется, в систему роликов, обеспечивающую знакопеременный изгиб проволоки. Далее она, имеющая после первой волоки диаметр  $d_1 < d_0$ , поступает во вторую неподвижно закрепленную расположенную соосно с первой коническую волоку меньшего диаметра, после которой проволока имеет диаметр  $d_2$  с последующим закреплением ее переднего конца в намоточном устройстве. После этого осуществляется процесс последовательной комбинированной деформации металла волочением за счет тянущего усилия, создаваемого вращением намоточного устройства [58, с. 2].

Для реализации непрерывного метода было разработано устройство для изготовления проволоки с ультрамелкозернистой структурой, на которое был получен патент на полезную модель № 130525 RU [59-60]. Принцип работы устройства поясняется рисунком 1.22 [59, с. 4].



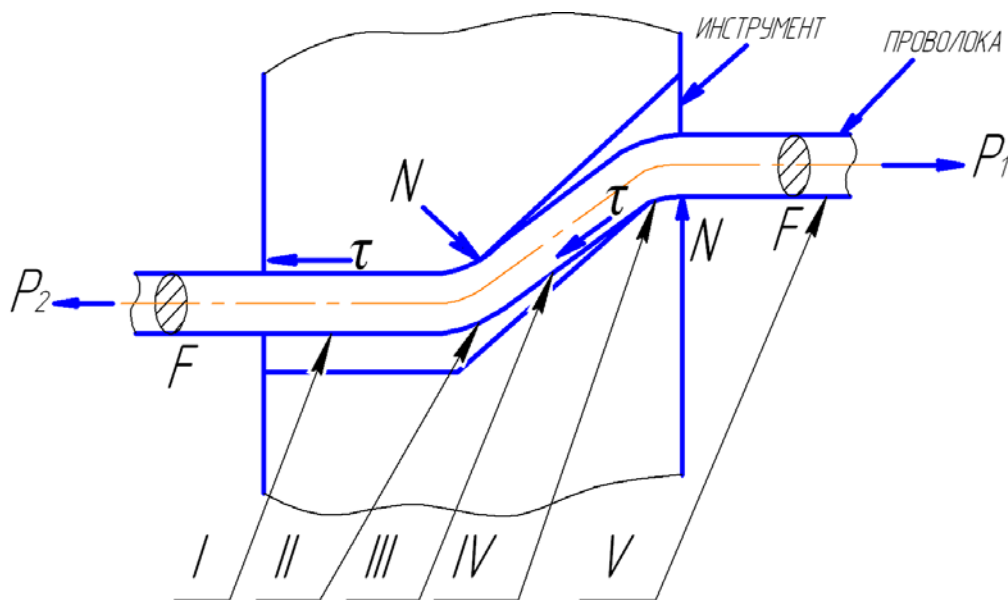
1 – рабочая волока; 2,7 – волокодержатель; 3 – рама; 4 – приводной механизм; 5 – заготовка; 6 – волока; 8 – валок

Рисунок 1.22 – Устройство для реализации непрерывного метода получения УМЗ проволоки



Указанное устройство содержит соосно установленные в направлении волочения входную рабочую волоку 1, размещенную в волокодержателе 2, жестко закрепленном с одной стороны стационарно расположенной рамы 3, приводной механизм 4 для кручения и знакопеременной деформации заготовки 5 и выходную рабочую волоку 6, установленную в волокодержателе 7, расположенном с другой стороны рамы 3. Приводной механизм 4 установлен с возможностью его перемещения вдоль продольной оси и последующей жесткой фиксации в заданном положении. Указанный технический прием позволяет регулировать степень деформации кручением в оптимальных пределах, улучшая механические свойства [59, с. 2].

Также следует отметить способ равноканальной угловой свободной протяжки (РКУПротяжка), приводящий к формированию УМЗ структуры в длиномерных заготовках круглого поперечного сечения (рисунок 1.23) [61]. Данный процесс заключается в многократном протягивании проволоки через специальные матрицы, в конструкции которых предусмотрены два пересекающихся под углом канала [61, с. 1]. В работах [62-63] изучено влияние термической обработки и конструкции матриц на механические свойства получаемых образцов, также показано, что для получения УМЗ структуры необходимо проводить от 4 до 10 циклов обработки, что является главным недостатком данного процесса. Стоит отметить, что при РКУПротяжке в обрабатываемых заготовках наблюдается неоднородная УМЗ структура даже после 8 проходов [63, с. 71].



$F$  – площадь поперечного сечения обрабатываемой заготовки;  $P_1$  – сила протяжки;  $P_2$  – сила противонапряжения;  $N$  – сила нормального давления;  $\tau$  – сила трения

Рисунок 1.23 – Схема РКУ-Протяжки



Многие из этих методов основаны на изгибе, так например многократное угловое накопительное волочение (AAD), описанное в работе [64] (рисунок 1.24). В отличие от РКУПротяжки, способ AAD характеризуется сложным режимом изменения вида деформаций – обжатием диаметра, растяжением и кручением, который влияет на изменение микроструктуры конечного продукта, что при соответствующем контроле приводит к улучшению свойств, что особенно важно для сплавов, не характеризующихся сложным составом.

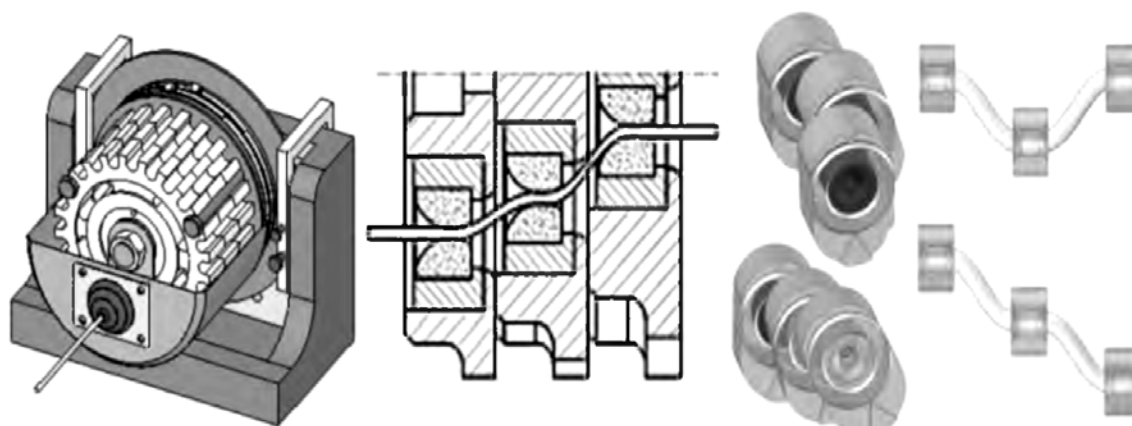


Рисунок 1.24 – Многократное угловое накопительное волочение (Accumulative Angular Drawing process - AAD)

В способе РКУ-Протяжки и AAD деформации растяжения, сжатия, изгиба и кручения осуществляются не в одном очаге деформации. Так деформация сжатия происходит в волоке, растяжения и кручения в промежутке между волоками. Но при производстве длиномерных изделий нецелесообразно использовать методы, основанные на изгибе из-за несовершенства оснастки и сложности встраивания его в действующее оборудование [65].

Известен процесс прокатки с наложением деформации продольного сдвига (называемый способом «прокатка-волочение (ПВ)»). По сравнению с обычным способом прокатки при ПВ действуют значительно меньшие усилия прокатки и достигаются большие обжатия [66].

Сущность процесса заключается в деформации полосы между вращающимися с различной скоростью валками ( $v_{b1}$  – окружная скорость ведущего валка,  $v_{b2}$  – окружная скорость ведомого валка), причем соотношение скоростей валков равно вытяжке (рисунок 1.25) [65, с. 54].

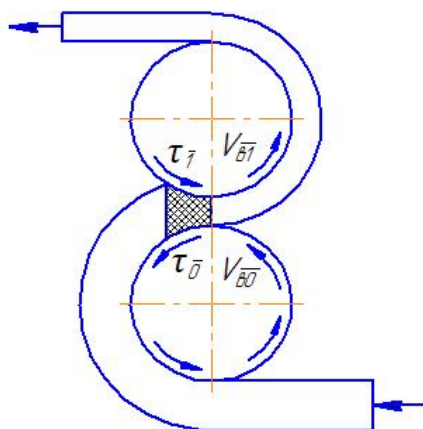
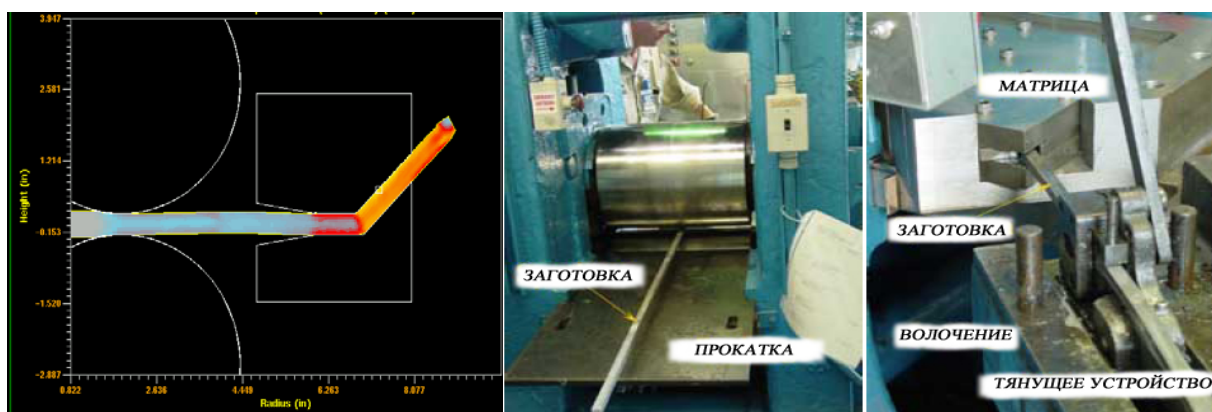


Рисунок 1.25 – Схема процесса прокатки с наложением деформации продольного сдвига (прокатка-волочение)

К концам полосы прикладывается натяжение для создания на дугах охвата трения покоя. При этом скорость заднего конца полосы автоматически поддерживается равной окружной скорости ведомого валка, а скорость переднего конца – равной окружной скорости ведущего валка. В данном процессе соотношение скоростей вращения валков пропорциональна вытяжке. Вытяжка величина, варьируемая и ее сложно удержать, особенно при волочении [65, с. 54].

Авторами [67] разработан способ прокатки-волочения через равноканальную угловую матрицу с углами пересечения  $135^{\circ}$  и  $120^{\circ}$  (рисунок 1.26), материал - алюминиевый сплав АА6061, шириной и высотой равной 12,5 мм и длиной 1,5 метра. При этом степень накопленной деформации при угле  $135^{\circ}$  за один проход составила  $\approx 0,5$ . Было выполнено успешно восемь проходов. Деформирование с углом  $120^{\circ}$  было также выполнено. По рекомендациям авторов обжатие в валках за первый проход должно составлять 2%, за второй и третий 1%.



а

б

а – математическая модель процесса; б – экспериментальная установка

Рисунок 1.26 – Прокатка-волочение в равноканальной угловой матрице

Этими же авторами предложен способ волочения через равноканальную угловую матрицу с заталкиванием заготовки при помощи комплекса насеченных роликов (рисунок 1.27) [68].

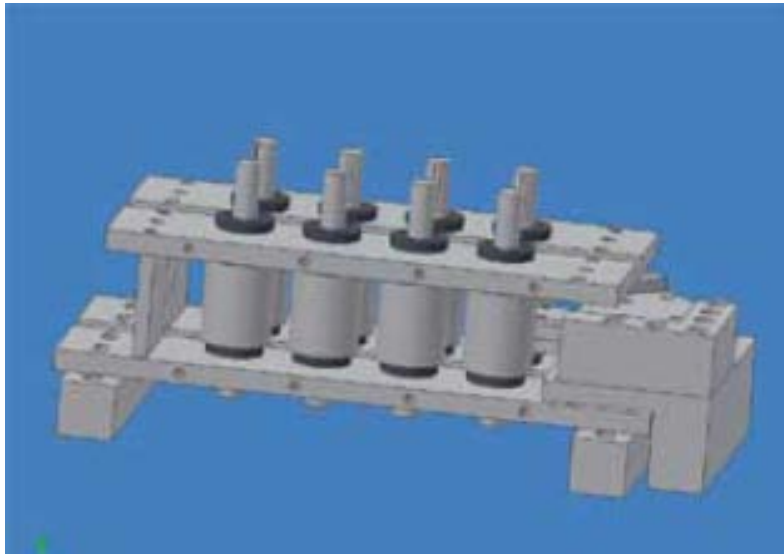


Рисунок 1.27 – Схема установки для равноканального углового волочения

Проблема, возникшая в процессе экспериментальной проверки процесса заключалась в том, что валы роликов испытывали упругое смещение при проталкивании заготовки в матрицу, что привело к разориентировке шестерен и выводу энергосиловых агрегатов из строя. Вопрос остается до сих пор нерешенным [67, с. 115].

Авторами [69] предложен способ непрерывного деформирования металлических изделий разного поперечного сечения. Процесс включает в себя реализацию непрерывного цикла деформации через равноканальную многоугловую матрицу. Как и в предложенном, так и в другом способе, проблема с реализацией подачи заготовки в инструмент решена путем использования комплекса насеченных роликов (рисунок 1.28) [69].

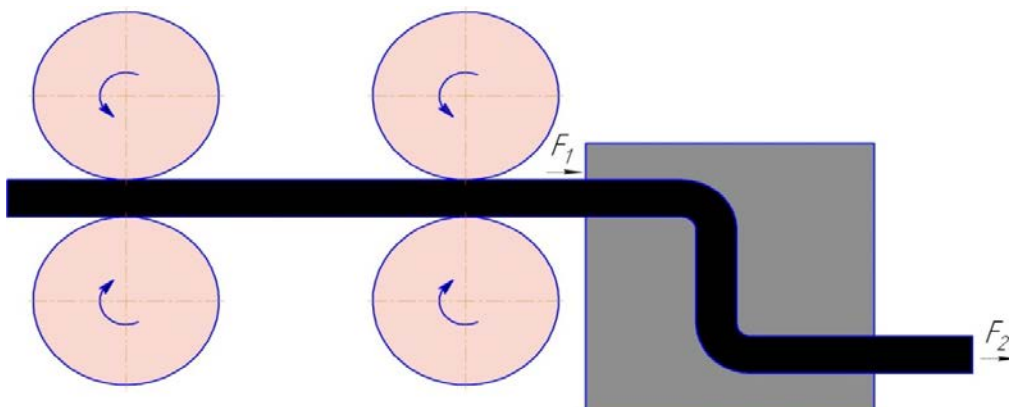


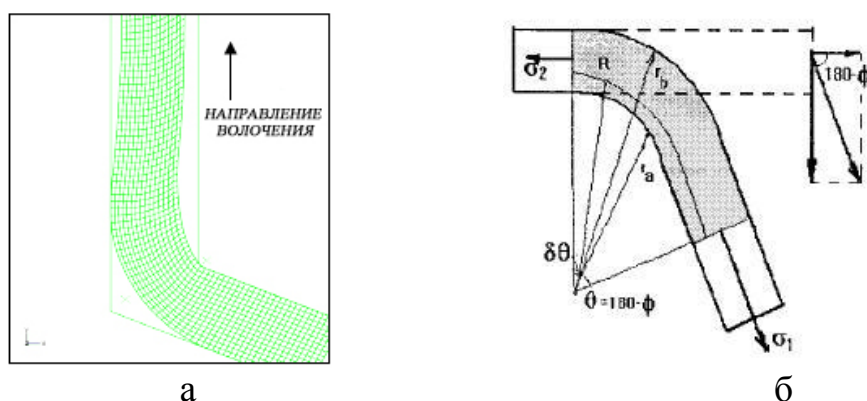
Рисунок 1.28 – Схематическое изображение подачи заготовки в процессе непрерывного равноканального многоуглового прессования

В одном из вариантов применения данного способа предложено использовать пару подобных роликов с целью вытягивания заготовки на выходе из матрицы, далее заготовка наматывается на барабан с целью обеспечения непрерывности.

При этом, одним из важных условий процесса является поддержание равенства скоростей на входе и выходе из инструмента тягового и заталкивающего инструмента. Также предлагается в качестве калибрующего прохода использовать ролики меньшего диаметра при этом необходима соответствующая корректировка скоростей вращения роликов. В данном способе с целью снижения лобового сопротивления со стороны вертикального канала предлагается делать значительные скругления стыков, что непосредственно снижает показатель деформации сдвига.

Идея, предложенная Суриади и др. [70] проталкивать заготовку через пересекающиеся каналы с целью устранения проблемы, связанной с нагрузкой сжатия при РКУП дала начало новому понятию в ИПД процессах известной как равноканальное угловое волочение РКУВ. РКУВ имеет значительные преимущества по сравнению с РКУП, во-первых, длина заготовки не ограничивается технологическими параметрами процесса, а именно нестабильностью давящего пуансона, и, во-вторых, РКУВ может быть использовано как промежуточная операция в других смежных областях промышленности. Особенность состоит в том, что характер течения материала больше схож с изгибом при растяжении (рисунок 1.29, а). В данном способе заготовку вначале изгибают с целью заполнения каналов матрицы, а затем протягивают.

Однако данный процесс не лишен недостатков. Так при прохождении заготовкой плоскости сдвига, внесенная сдвиговая деформация также приводит к некоторому изменению поперечного сечения, а именно к утонению заготовки (рисунок 1.29 б) [70].



а – схема течения материала; б – деформированная форма, указывающая на изменение толщины заготовки

Рисунок 1.29 – Иллюстрация РКУВ

## 1.4 Совмещенный процесс «прессование-волочение»

За основу разрабатываемого метода был выбран процесс классического волочения, являющийся в данный момент основным способом производства проволоки.

В настоящее время для получения проволоки с мелкозернистой и наноструктурой развиваются способы непрерывной обработки, основанные на применении деформации изгиба и кручения, описанные в разделе 1.3. настоящей работы. Однако они требуют применения сложного оборудования, которое не всегда можно установить на волочильные машины, особенно современные. Также для формирования мелкозернистой структуры в металлах используют методы ИПД, основанные на схеме простого сдвига, которые нашли свое применение в промышленности, поэтому нами была рассмотрена возможность совмещения двух схем деформации – волочения и РКУП.

Так на кафедре «ОМД» Карагандинского индустриального университета в 2009 г. был предложен новый способ деформирования заготовок – равноканальное угловое волочение (РКУВ) [71], заключающийся в протяжке проволоки через равноканальную ступенчатую матрицу, который позволяет получать проволоку с ультрамелкозернистой структурой (рисунок 1.30).

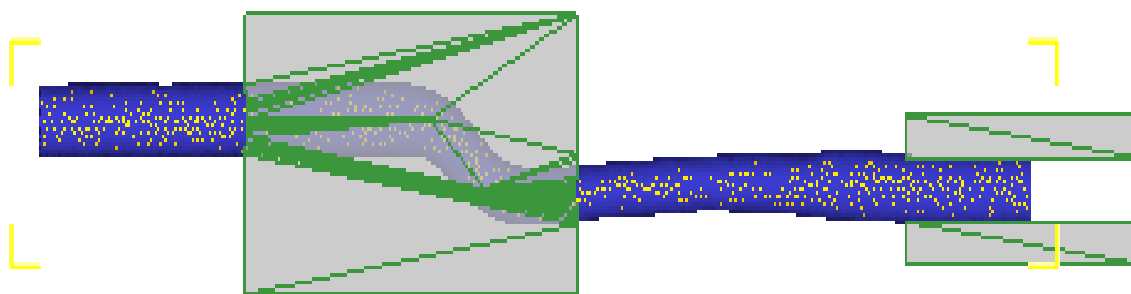
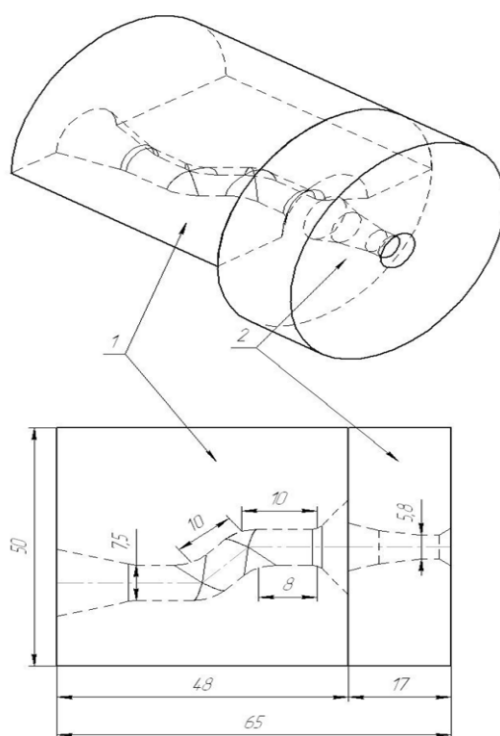


Рисунок 1.30 – Схема РКУВ

Недостатком данного процесса является изменение геометрических размеров поперечного сечения (утонение) проволоки, что недопустимо. В связи с этим можно предположить о нефункциональности РКУВ в едином решении, другими словами, для успешной реализации данного процесса необходимо его совмещение с другими процессами пластической деформации, например с традиционным волочением. Поэтому на основе вышеописанной технологии предложена новая совмещенная технология «равноканальное угловое прессование-волочение» (РКУВ-В), позволяющая получать проволоку с ультрамелкозернистой структурой и при этом с высокой точностью сечения за счет применения волоки на выходе (рисунок 1.31) [72].



1 – матрица РКУП; 2 – волокна

Рисунок 1.31 – Схема волокна совмещенной с матрицей

Вводимая в полость волокодержателя с матрицей волокна, представляет из себя диск диаметром 50 мм с отверстием в центре, представляющее собой переходящие конусные каналы, и калибрующего канала, а также выходного конусного канала. Суть процесса заключается в следующем: проволока предварительно изгибается, принимая форму каналов матрицы, матрица вставляется в волокодержатель волочильного стана, захватами захватывается передний конец проволоочной заготовки и на заправочной скорости проволока протягивается через равноканальную ступенчатую матрицу [71, с. 84]. Недостатком данного процесса является искажение геометрических размеров поперечного сечения (овализация) проволоки.

Для устранения данного недостатка в работе [6, с. 35] предложено заталкивающее устройство.

## Выводы

Анализ научно-технической и патентной литературы показал, что дискретные методы получения ультрамелкозернистой структуры, описанные в разделе 1.1. настоящей работы, не могут быть применены в промышленных масштабах, так как имеют ограничения по длине получаемой продукции. Но такой метод, как РКУП часто используется для совмещенных и комбинированных процессов, и их модернизация может дать возможность использовать их преимущества с наибольшей эффективностью.

Совмещение традиционных методов получения катанки с методами ИПД приводит к формированию однородной УМЗ структуры и повышенного комплекса механических и функциональных свойств и в этой связи разработка нового совмещенного процесса, сочетающего преимущества используемых схем, является актуальной задачей.

Проанализировав способы измельчения структуры, можно предположить, что наиболее эффективными способами при производстве проволоки являются способы, основанные на кручении. Предложенный способ непрерывного деформационного наноструктурирования проволоки РКУВ использует дополнительную сдвиговую деформацию путем знакопеременного изгиба и кручения. Оборудование для реализации этого способа хорошо встраивается в линию волочильной машины. Однако данный способ требует дополнительного оборудования, а степень накопленной деформации сдвига ограничивается высокой вероятностью разрушения металла при кручении. При внедрении же предлагаемого совмещенного процесса «прессование-волочение» в производство не потребуются значительных экономических вложений так, как он не требует переоборудования существующих волочильных станков, требуется только добавление в конструкцию оборудования специально изготовленной равноканальной ступенчатой матрицы, предназначенной для протягивания через нее материала.

Исходя из вышесказанного, необходимо провести комплекс исследований по конструированию нового метода непрерывного деформирования проволоки из различных марок, основанного на совмещении волочения с РКУП. С одной стороны, необходимость проведения данных исследований обусловлена тем, что расширение рынка сбыта проволоки требует обеспечения такого сочетания прочностных и пластических свойств, которое достаточно сложно получить традиционными методами обработки. Поэтому с этой точки зрения формирование в проволоке ультрамелкозернистой структуры является единственно возможным вариантом. С другой стороны, при производстве проволоки основной операцией является волочение, которое, как известно, изучено теоретически и имеет хорошую техническую и технологическую оснащенность. Поэтому на данный момент представляет практический интерес разработка такого метода деформационного диспергирования наноструктурирования, который по своим скоростным параметрам совместим со скоростями волочения на действующем промышленном оборудовании. При волочении основными деформациями, действующими на проволоку, являются деформации растяжения и сжатия, а для формирования ультрамелкозернистой структуры металлов и сплавов необходимо воздействие деформаций сдвига на обрабатываемую проволоку [73-74]. Применение же равноканальной ступенчатой матрицы позволит получать проволоку с ультрамелкозернистой структурой. Учитывая вышеизложенное, основной задачей монографии является, на основе проведенных комплексных исследований, разработать оптимальную технологию получения высокопрочной проволоки с

улучшенными свойствами при минимальной модернизации оборудования существующей технологии волочения. Новая технология позволит:

- заменить легированные стали для укрепления конструкций из железобетона в качестве арматуры углеродистыми или с пониженным содержанием легирующих элементов;

- для алюминия увеличит прочность проволоки для исключения ее удлинения при провисании проводов, особенно в холодное время года в случае образования наледи;

- для меди увеличит прочность проволоки и заменить контактные провода с меньшим количеством упрочняющих легирующих элементов, что позволит повысить электропроводность.



## 2 ТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕЩЕННОГО СПОСОБА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРОВОЛОКИ

### 2.1 Анализ возможностей программных комплексов для моделирования методом конечных элементов процессов обработки металлов давлением с учетом неоднородности их структуры

Для проверки теоретических выводов необходимо произвести математическое моделирование процесса «прессование-волочение». Моделирование различных процессов деформирования в обработке металлов давлением является перспективным приемом, поскольку оно позволяет исследователю заглянуть «внутрь» процесса, оценить возникающие напряжения и деформации, предсказать появление новых дефектов их развитие и закрытие. Также моделирование позволяет выявить рациональные параметры инструмента и заготовки для наилучшего протекания процесса. А современные программные комплексы моделирования предоставляют широчайшие возможности для работы. Они позволяют смоделировать практически любой процесс, минуя дорогостоящие эксперименты.

В настоящее время разработано большое количество программ для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессах обработки металлов давлением, что определяет необходимость проанализировать имеющийся инструментарий и целесообразность его применения для решения поставленных задач [75]. Но модуль эволюции микроструктуры при процессах ОМД есть только в трех программах: QForm (2D, 3D), Simufact.forming (2D, 3D) и DEFORM (2D, 3D).

Программа QForm основана на методе конечных элементов (ядро системы), предназначена для проектирования оснастки, штампового инструмента, моделирования штамповки,ковки и других процессов ОМД, оптимизации технологических процессов. QForm позволяет моделировать: ковку, объёмную штамповку (холодную и горячую), вальцовку и прокатку, процесс раскатки, экструзию (прессование профилей), термообработку и изменение микроструктуры во время технологического процесса.

Simufact.forming позволяет получить реалистичное представление технологических процессов с полноценной 3D визуализацией всех инструментов и деталей. Данная программа оснащена базой данных Matilda для оценки микроструктуры стали и сплавов. Для получения данных по микроструктуре Matilda использует данные напряженно-деформированного состояния, скорости деформации и температуры моделей, полученных Simufact.forming. Затем она дополняет их сведениями физико-химических свойств для данного материала и его структуры из базы данных, затем, используя алгоритм Yada [76], вычисляет параметры процессов статической и динамической рекристаллизации, которые могут приводить к изменению размера зерна.

DEFORM-3D – система моделирования технологических процессов, предназначенная для анализа трехмерного поведения металла при различных процессах обработки металлов давлением, термической и механической обработки. Система предоставляет важную информацию о течении материала в штампе и распределении температур в процессе деформирования. DEFORM позволяет проверить, отработать и оптимизировать технологические процессы непосредственно за компьютером, а не в ходе экспериментов на производстве методом проб и ошибок. С помощью DEFORM возможно моделировать практически все процессы, применяемые в обработке металлов давлением (ковка, штамповка, прокатка, прессование и др.), а также операции термической обработки (закалка, старение, отпуск и др.) и механообработки (фрезерование, сверление и др.) [77].

Так как QForm – это программа, которая с самого начала разрабатывалась, прежде всего, для специалистов кузнечно-штамповочного производства, то при моделировании будем использовать программу DEFORM-3D и ее вспомогательный модуль MICROSTRUCTURE-3D. Этот модуль позволяет рассматривать эволюцию микроструктуры на каждом шаге деформирования. Важной особенностью данного модуля является то, что для его использования не нужно заново строить и просчитывать модель деформирования, поскольку расчет микроструктуры ведется по принципу постпроцессора [78].

## **2.2 Моделирование совмещенного процесса «прессование-волочение»**

Построение модели эксперимента состояло из нескольких этапов:

- создание трехмерных геометрических моделей волокна (рисунок 2.1а), матрицы (рисунок 2.1б), и заготовки (рисунок 2.1в), а на их основе конечно-элементную геометрическую модель эксперимента;
- описание внешних воздействий и граничных условий для конечно-элементной модели;
- расчет НДС и анализ полученных результатов.

На первом этапе с помощью программы компьютерного проектирования КОМПАС-3D создавалась геометрическая трехмерная модель матрицы, волокна и заготовки (рисунок 2.1). Далее геометрическая трехмерная модель импортировалась в программу DEFORM, где формировалась собственно конечно-элементная модель – основа для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) [78, с. 97].

В качестве материала заготовки была выбрана сталь Ст.3 (A 570 Grade 36). Реологические свойства материала были взяты из базы данных DEFORM. Материал заготовки до деформации является изотропным, в нем отсутствуют какие-либо напряжения и деформации. Заготовка, используемая для анализа, имела цилиндрическую форму диаметром 7,0 мм и длиной 300 мм и была разбита на 180 000 конечных элементов, со средней длиной ребра элемента 0,5 мм. С целью исключения застревания проволоки в каналах матрицы при моделировании было принято условие минусового допуска на диаметр

проволоки и плюсового допуск на отверстие равноканальной ступенчатой матрице. Материал равноканальной матрицы и волоки были приняты абсолютно жесткими. Модель заготовки была принята, как упругопластическая. Температура заготовки, как и температура матрицы, была выбрана равной 20°C – для получения оптимальных значений параметров НДС и усилий деформирования.

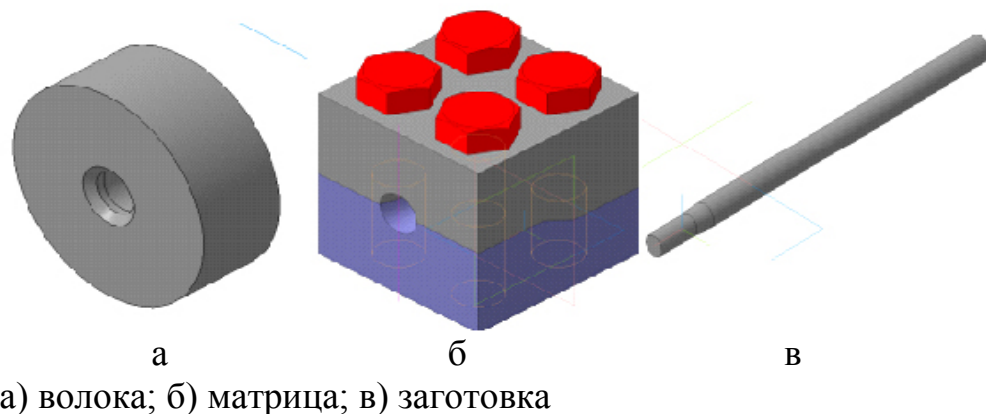


Рисунок 2.1 – Модели волоки, матрицы и заготовки

Так же для моделируемого эксперименты, согласно литературному обзору, были заданы значения коэффициента трения между заготовкой, матрицей  $\mu=0,08$ ; коэффициент теплообмена с окружающей средой, равный 1; скорость волочения была равна действующей скорости на волочильном стане 1,5м/с. Скорость прессования была установлена в соответствии с согласованием скоростей в 1,16 раз меньше скорости волочения и равна 1,29 м/с.

Прототипом исследуемого совмещенного процесса является совмещенный процесс РКУ-протяжки, подробно исследованный в работе [79]. В том процессе основная стадия деформирования заключалась в многократной протяжке проволоки через равноканальную ступенчатую матрицу, что позволяло получать материал с ультрамелкозернистой структурой и улучшенными прочностными характеристиками протягиваемого материала. Недостатком данного процесса являлось искажение геометрических размеров поперечного сечения (овализация) проволоки, что недопустимо. Модель данного процесса в среде Deform 3D приведена на рисунке 2.2.

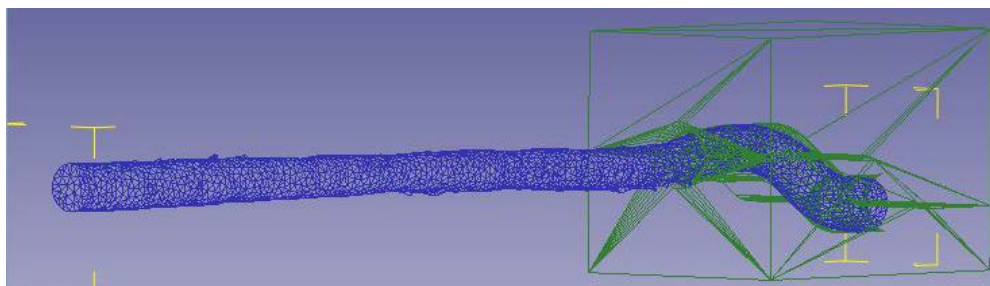


Рисунок 2.2 – Процесс протяжки проволоки через равноканальную угловую матрицу

При моделировании процесса РКУ-протяжки происходит изменение поперечного сечения образцов в местах контакта с матрицей (рисунок 2.3) [78, с. 99].

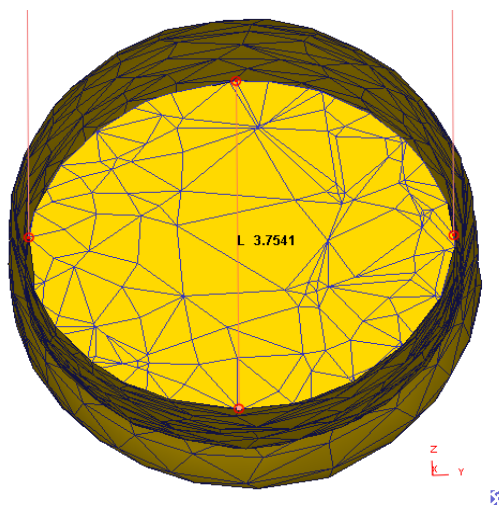


Рисунок 2.3 – Геометрия поперечного сечения образца при РКУ-протяжке

Для устранения дефекта геометрии в работе [6, с. 34] было предложено дополнительно использовать волоку, установленную непосредственно после равноканальной угловой матрицы, для калибровки проволоки и придания требуемого размера и формы профиля поперечного сечения. Данный процесс был смоделирован в среде Deform 3D. Для этого была смоделирована матрица, включающая в себя равноканальную угловую матрицу и волоку (рисунок 2.4).

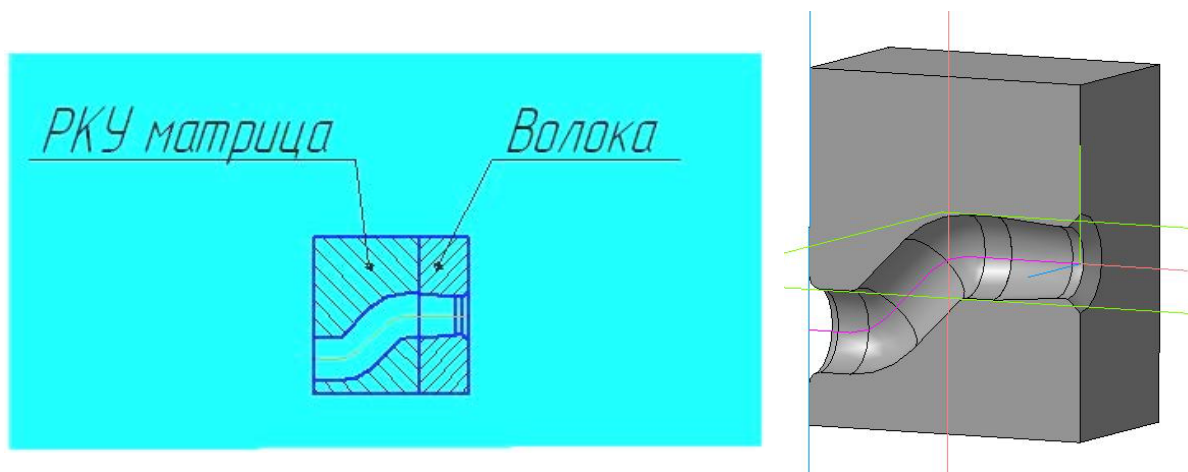
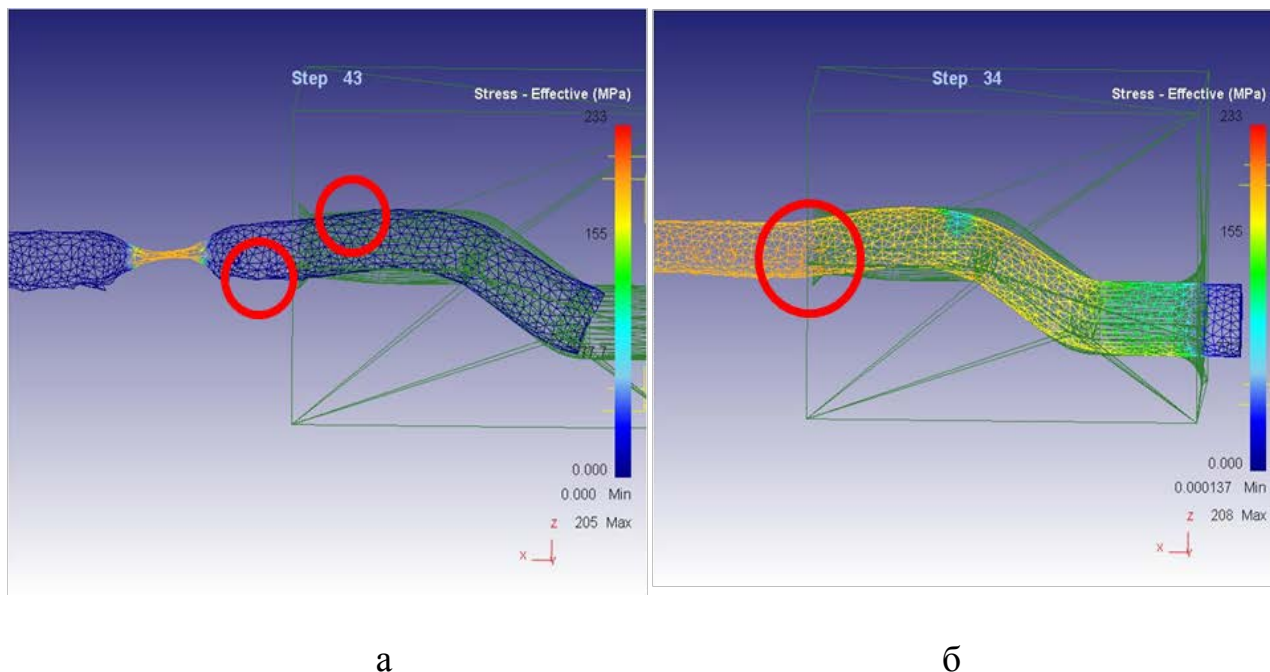


Рисунок 2.4 – Матрица, совмещенная с волокой

В результате проведенных исследований было установлено, что протекание данного процесса не возможно, из-за чрезмерного возрастания усилия волочения, в разы превышающего предел прочности материала образца, что приводило к обрыву проволоки. Пластическая деформация продолжается и

после выхода заготовки из инструмента и, как следствие, возникают затяжки (утонения) и обрывы (рисунок 2.5а). Также за счет утонения проволоки при прохождении канала матрицы не происходит полное заполнение его пространства, что также негативно сказывается на проработывании поперечного сечения образца (рисунок 2.5б) [80].



а – утонение проволоки; б – овализация проволоки

Рисунок 2.5 – Моделирование процесса в совмещенной матрице

Данный недостаток можно устранить, если к заднему концу задаваемого образца приложить наряду с усилием волочения заталкивающее усилие. Процесс деформирования по предлагаемой схеме, т.е. прессование-волочение с использованием равноканальной ступенчатой матрицы, волокни и заталкивающего усилия так же смоделировали в программном комплексе Deform [81]. В ходе проведенного моделирования удалось добиться стабильности протекания процесса. Также в результате применения заднего подпора удалось добиться полного заполнения канала матрицы, что улучшит проработку образца в поперечном сечении (рисунок 2.6) и исключит обрыв проволоки на выходе из матрицы. Особенностью последнего варианта совмещенного процесса прессование-волочение является необходимость согласования скоростей заталкивания и вытягивания образца [78, с. 99].

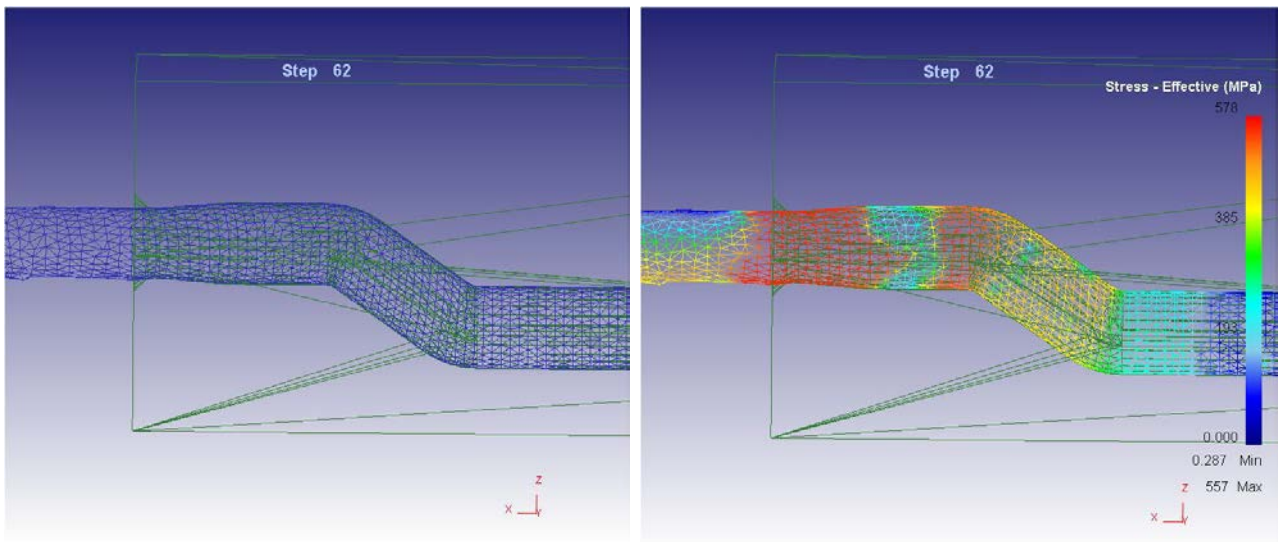


Рисунок 2.6 – Модель совмещенного процесса с задним подпором

Несмотря на это, экспериментальные исследования показали, что в ряде случаев все равно возникал обрыв проволоки. Это происходило из-за того, что матрица и волока находились в непосредственной близости друг от друга. В результате очаги деформации прессования и волочения сливались воедино, что приводило к аккумулярованию растягивающих напряжений. Для устранения этого недостатка было решено отдалить волоку от матрицы на некоторое расстояние. Модель данного процесса в среде Deform 3D приведена на рисунке 2.7.

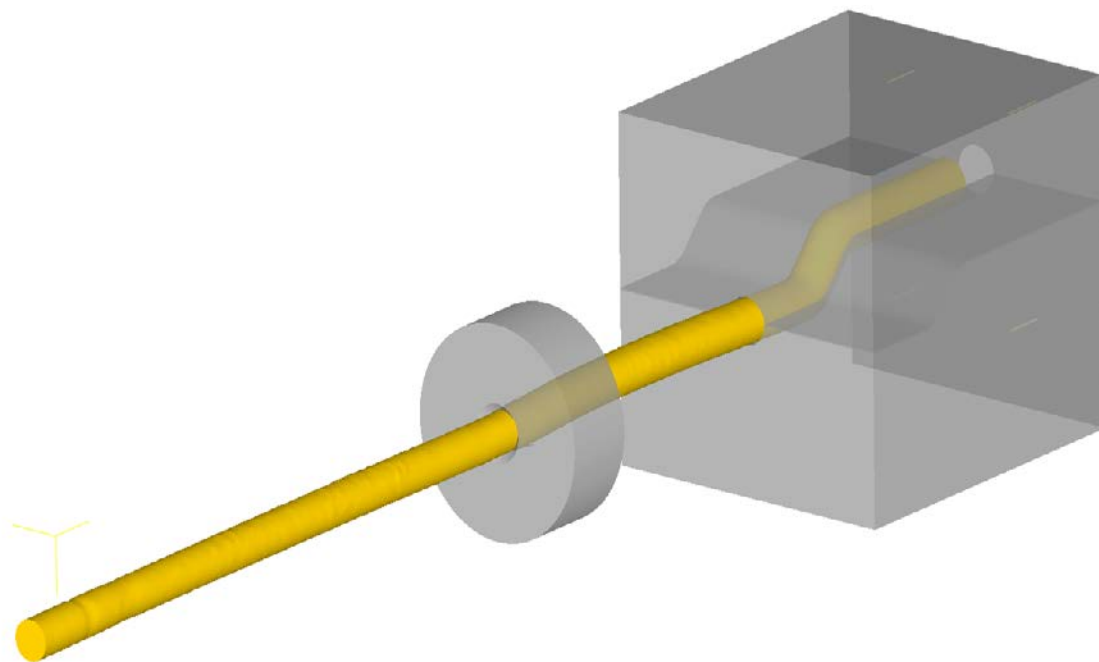


Рисунок 2.7 – Новый вариант процесса «прессование-волочение»

В результате проведенного моделирования и исследования формоизменения было выявлено, что новый вариант совмещенного процесса протекает более стабильно, в матрице происходит полное заполнение стыков каналов, по всей длине заготовки не наблюдается признаков вынужденного утонения.

Для более детального анализа новой схемы прессования волочения было решено провести исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) [82].

Исследование напряженного состояния является одним из главных этапов разработки нового технологического процесса. Это связано с тем, что данные исследования позволяют изучить распределение напряжений во всем объеме заготовки при деформировании, а также выявить те зоны, которые в большей мере подвержены образованию дефектов вследствие возникновения в них больших растягивающих напряжений. Это дает возможность внести необходимые коррективы для снижения интенсивности действия растягивающих напряжений и, как следствие, предотвратить образование дефектов. Изучение деформированного состояния позволяет оценить общую проработку заготовки в ходе деформирования. Таким образом, появляется возможность оценить эффективность исследуемого процесса.

Для определения значений напряжения и деформации необходимо находить значения компонентов соответствующих тензоров, которые для трехмерного течения металла очень сложно визуализировать. Поэтому обычно при рассмотрении параметров НДС используют простые показатели интенсивности деформации и напряжения, или так называемые эквивалентная деформация и эквивалентное напряжение, которые включают в себя компоненты деформации и напряжения в следующем виде:

$$\varepsilon_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (2.1)$$

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – главные деформации,  
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения.

При реализации рассматриваемого совмещенного процесса «прессование – волочение» в заготовке последовательно возникают 2 очага деформации, что делает данный процесс достаточно сложным. Поэтому, для изучения параметров НДС необходимо исследовать не только эквивалентную деформацию и эквивалентное напряжение, но и параметры, которые позволяют оценить долю растягивающих и сжимающих напряжений в очаге деформации. Таковыми являются максимальные растягивающие и сжимающие напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ . Их значения находят по следующим формулам:



$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.3)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.4)$$

Компонент  $\sigma_2$  обычно не рассматривается, поскольку он является средним арифметическим от  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ .

В Deform имеется возможность представления каждого из главных напряжений по отдельности. Однако, наиболее удобно оценивать данные параметры комплексно. Для этого используется параметр Гидростатическое давление или среднее напряжение (stress mean).

При рассмотрении эквивалентного напряжения следует понимать, что данный параметр не показывает, какое напряжение действует в конкретной точке – растягивающее или сжимающее. Являясь полностью подкоренным выражением, его значение всегда положительно. Оно показывает интенсивность действия напряжения, т.е. есть ли в данной точке напряжение или нет. Его значение характеризует среднюю величину всех напряжений, действующих в данной точке [83]. Результаты распределения эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{эkv}}$  при прессовании-волочении представлены на рисунке 2.8.

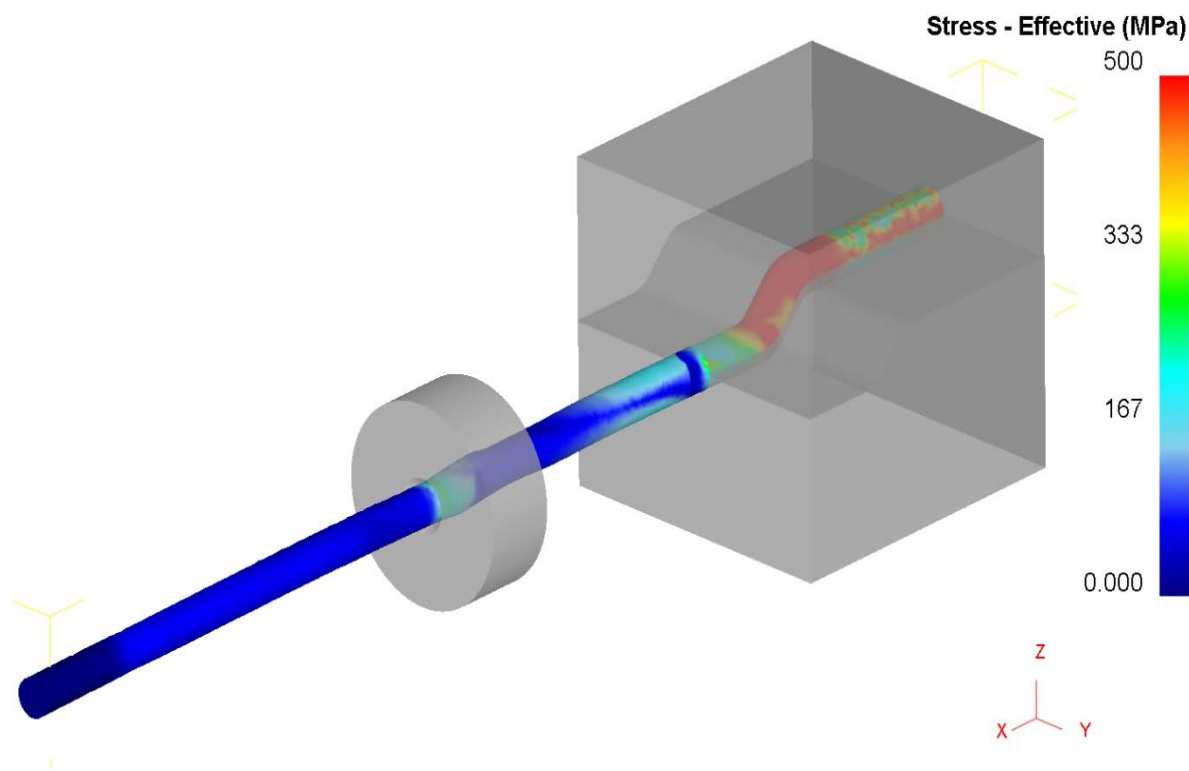


Рисунок 2.8 – Распределение эквивалентных напряжений

При рассмотрении данного параметра видно, что максимальные значения напряжений при прессовании-волочении сосредоточены в зоне стыков каналов матрицы. Здесь напряжение достигает значения 450÷470 МПа. В очаге деформации волокна значение напряжения значительно ниже – около 190÷200 МПа. На участке между матрицей и волоком имеется зона с пониженными значениями напряжений – так называемая зона разгрузки. Здесь значение эквивалентных напряжений при установившемся процессе практически не изменяются, равно 140÷150 МПа и остается примерно на одном уровне с незначительными отклонениями до 4-5%. В зоне волочения (от волокна до переднего конца заготовки) наблюдается равномерное распределение напряжения, равного 80÷90 МПа.

Из работы [84] известно, что знак гидростатического давления характеризует физическое состояние частицы. Когда частица подвергается растягивающему напряжению, гидростатическое давление является положительным, и наоборот, когда частица подвергается сжимающим напряжениям, гидростатическое давление отрицательно. На качество металла (на лучшую проработку структуры и заваривание внутренних дефектов) положительно влияет наличие сжимающих напряжений внутри деформируемого тела, возникающих в процессе его деформирования. Эти напряжения можно охарактеризовать распределением среднего напряжения  $\sigma_{cp}$  (рисунок 2.9).

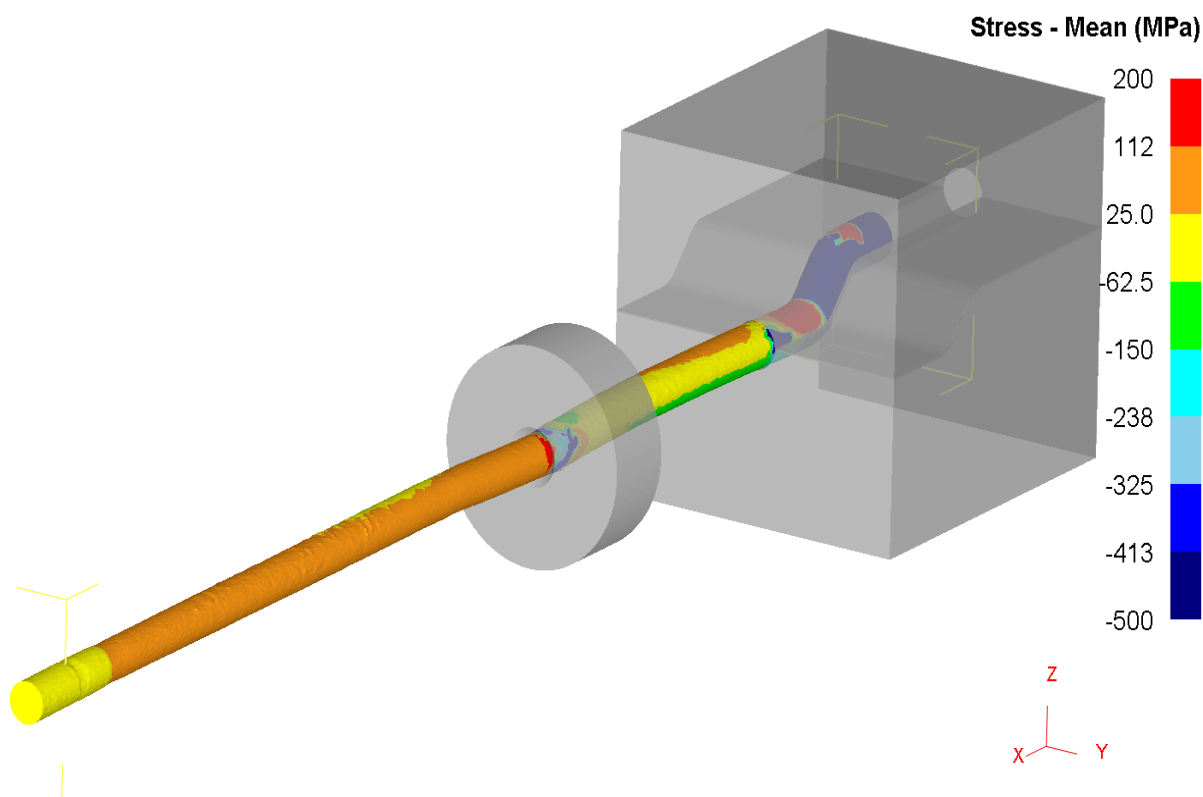


Рисунок 2.9 – Распределение средних напряжений

Характер распределения средних напряжений показывает, что на протяжении всей матрицы, за исключением небольших зон, преобладают сжимающие напряжения, достигающие значения -450 МПа. На выходе из матрицы в зоне разгрузки также действуют сжимающие напряжения, однако их величина значительно ниже, около -60 МПа. В очаге деформации волокна также преобладают сжимающие напряжения, их величина здесь достигает -280 МПа. Зоны растягивающих напряжений на наклонном канале расположены у верхней стенки, что объясняется повышенным значением коэффициента трения на данном участке, а также действием напряжений изгиба. Здесь их величина достигает 120 МПа. В зоне волочения (от волокна до переднего конца заготовки) наблюдается зона растягивающих напряжений, равных 80÷90 МПа.

Возрастание роли напряжений сжатия в общей схеме напряженного состояния увеличивает пластичность. В условиях резко выраженного всестороннего сжатия является возможным деформировать даже очень хрупкие материалы. Схема всестороннего сжатия является наиболее благоприятной для проявления пластических свойств, так как при этом затрудняется межзеренная деформация и вся деформация протекает за счет внутризеренной. Возрастание роли напряжений растяжения приводит к снижению пластичности. В условиях всестороннего растяжения с малой разностью главных напряжений, когда касательные напряжения малы для начала пластической деформации, даже самые пластичные материалы хрупко разрушаются [85].

Таким образом, схема всестороннего сжатия, обеспечиваемая в большей части матрицы, а также превышение по абсолютному значению сжимающих напряжений над растягивающими, гарантирует отсутствие макро- и микротрещин в металле и благоприятствует максимальной степени пластичности деформируемой заготовки в матрице, а затем и волоке.

Как было отмечено выше, для изучения деформированного состояния используют показатель интенсивности деформации – эквивалентная деформация. Данный параметр позволяет отследить степень накопленной деформации, которая носит кумулятивный характер.

Исследуемый совмещенный процесс включает в себя 2 стадии – РКУП и волочение. Исходя из данных работы [86] эквивалентная деформация после 1 прохода прессования в матрице с параллельными каналами может быть представлена в следующей форме:

$$\varepsilon_{ЕСАР-РС} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot \left( \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left( \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right], \quad (2.5)$$

где  $\Phi$  – угол стыка каналов;

$\Psi$  – угол, образованный дугой скругления между двумя каналами.

При волочении круглого прутка (или проволоки) площадь поперечного сечения прутка уменьшается, а длина увеличивается (рисунок 2.10) [87].

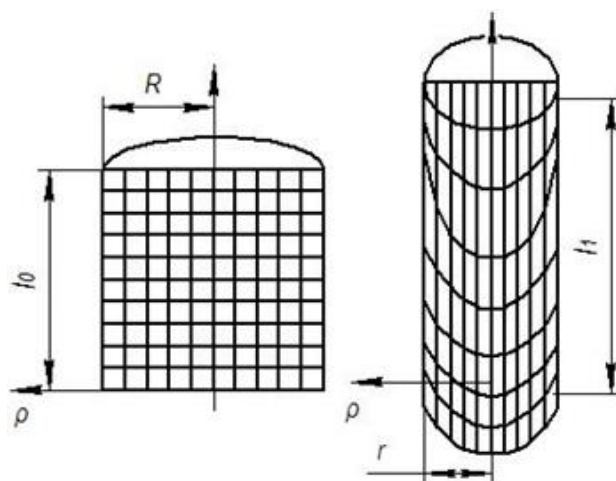
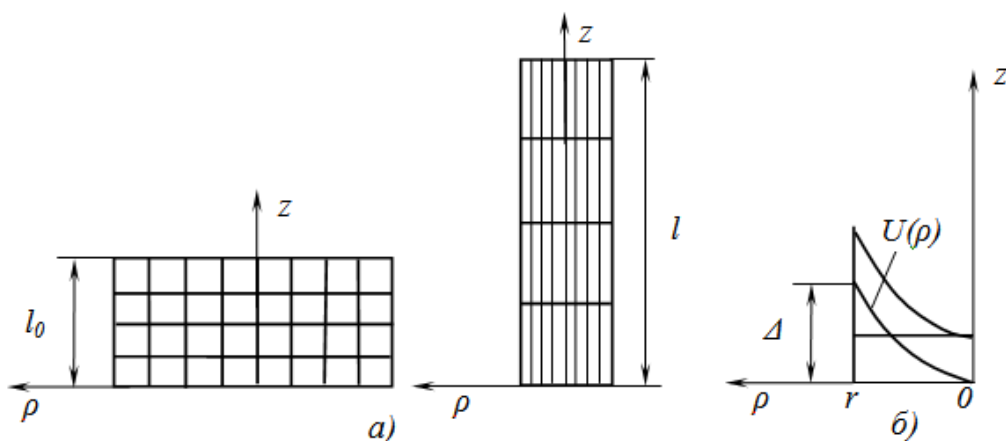


Рисунок 2.10 – Заготовка с координатной сеткой до и после волочения

Линейные характеристики деформации дают представление лишь об изменении формы деформируемого при волочении металла – изменении длины и площади поперечного сечения. Фактически под действием сил, действующих в области деформирующей конической поверхности фильеры, периферийные слои цилиндрического образца получают большие деформации неоднородного сдвига, чем слои, расположенные вблизи оси. При этом координатная сетка, нанесенная на диаметральный плоскость образца, искажается: вертикальные линии сетки остаются параллельными оси  $Z$ , а горизонтальные из прямых линий преобразуются в параболы (рисунок 2.11) [87, с. 67].



а) деформация растяжения; б) осесимметричный сдвиг

Рисунок 2.11 – Схемы деформации растяжения и осесимметричного сдвига при волочении

Комплексной характеристикой деформации является интенсивность деформаций. Для вычисления интенсивности деформаций результирующее деформированное состояние заготовки после волочения представляют как сумму растяжения и неоднородного осесимметричного сдвига [87, с. 68].

Соответственно интенсивность деформаций при волочении:

$$\varepsilon_{\text{ВОЛОЧ}} = \sqrt{\left(\ln \frac{R}{r}\right)^2 + \frac{8}{3} \left[\frac{\Delta \rho}{r r}\right]^2} \quad (2.6)$$

При изучении деформированного состояния необходимо не только обеспечить высокий уровень эквивалентной деформации, требуемый для формирования ультрамелкозернистой структуры, но и равномерное распределение этого параметра по сечению заготовки. Поэтому рассмотрение данного параметра проводилось в двух вариантах – на поверхности заготовки и по осевому сечению (рисунок 2.12).

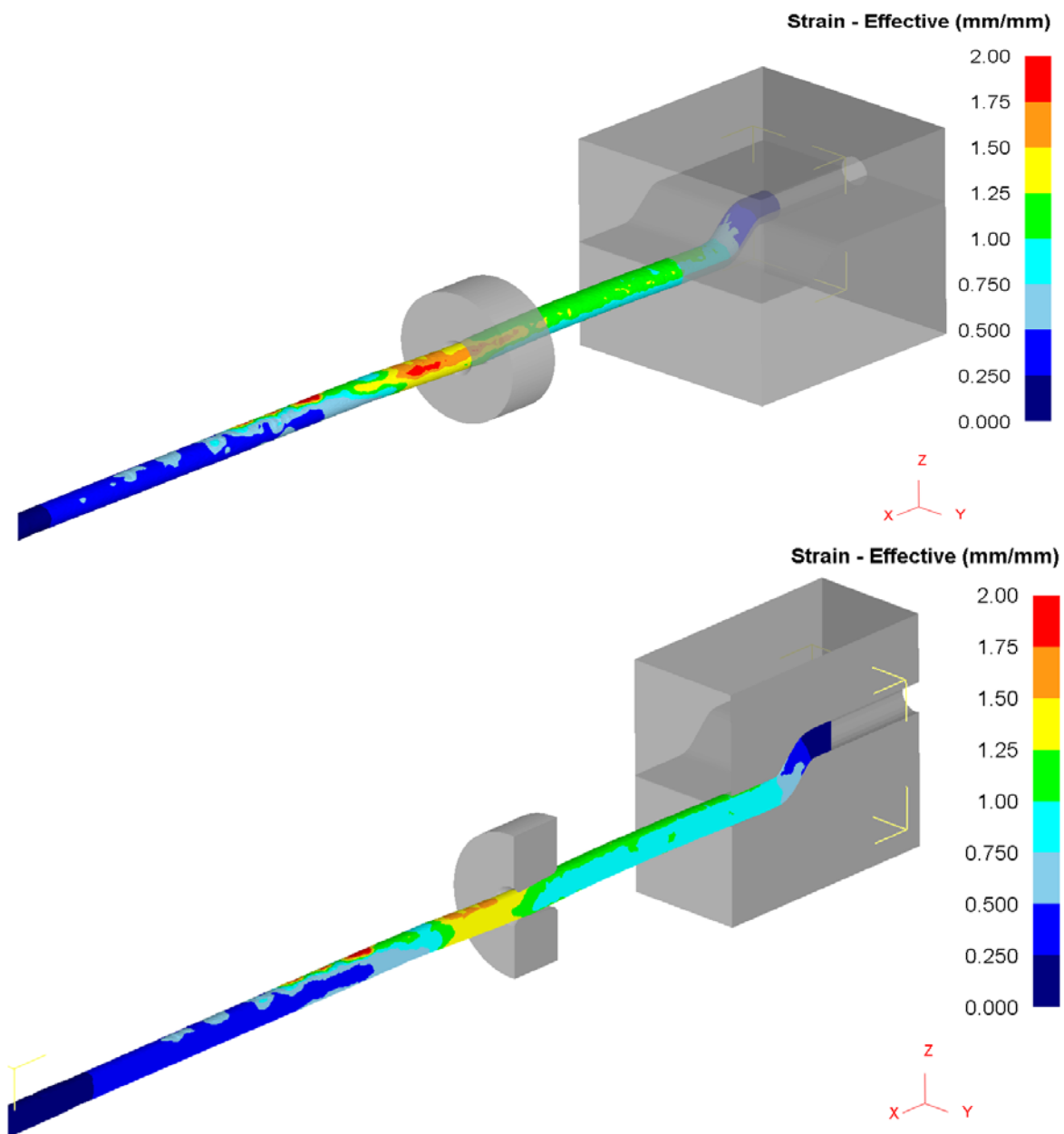


Рисунок 2.12 – Распределение эквивалентной деформации

В первом очаге деформации в матрице заготовка проходит последовательно 2 стыка каналов, где реализуется деформация сдвига. Значение эквивалентной деформации после прохождения первого стыка достигает 0,75 в поверхностных слоях и 0,65 в центральных слоях – здесь разница значений эквивалентной деформации достигает 15%. После прохождения второго стыка значение эквивалентной деформации достигает 1,05 в поверхностных слоях и 0,95 в центральных слоях, т.е. разница значений эквивалентной деформации достигает 11 %. После стадии волочения значение эквивалентной деформации достигает 1,55 в поверхностных слоях и 1,45 в центральных слоях. Таким образом, разница значений эквивалентной деформации снижается с 15 % до 6,5 %.

В таблице 2.1 представлены значения эквивалентной деформации, полученные после моделирования и расчета по формулам (2.5) и (2.6).

Таблица 2.1 – Значения эквивалентной деформации

Операция	После РКУП	После волочения	Суммарная величина
Расчет	0,89	0,47	1,36
Моделирование	0,95	0,5	1,45
Разница значений, %	6,3	6	6,2

Как видно из величин разницы значений, полученная модель является достаточно точной, т.к. полученные при моделировании значения эквивалентной деформации незначительно отличаются от теоретических.

С учетом того, что схема сдвига повышает интенсивность измельчения исходной структуры, были проведены исследования, оценивающие формирующуюся схему в очагах деформации. В качестве критерия оценки схемы деформации был использован коэффициент Лоде-Надаи. Данный коэффициент позволяет провести оценку природы возникающей деформации в заготовке, т.е. определить, какой тип деформации реализуется в конкретной точке – растяжение, сжатие или сдвиг. Коэффициент Лоде-Надаи был рассчитан по формуле (2.7) [88]:

$$\mu = 2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad (2.7)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения, МПа.

Величина коэффициента варьируется от -1 до 1. Значение от 0 до 1 соответствует сжатию; от 0 до -1 соответствует растяжению; значение коэффициента, стремящееся к 0, соответствует сдвигу [89]. Для определения коэффициента Лоде-Надаи на заготовке было создано 70 точек по продольной оси с шагом 5 мм, по которым проводились замеры параметров НДС.

Условно заготовку можно разделить на следующие зоны (рисунок 2.13):

- 1) зона волочения (точки 1÷27);
- 2) расстояние между зонами стыков каналов в матрице и волокни (точки 28÷48);
- 3) зона стыка каналов в матрице (точки 49÷56);
- 4) хвостовая зона (точки 57÷70).

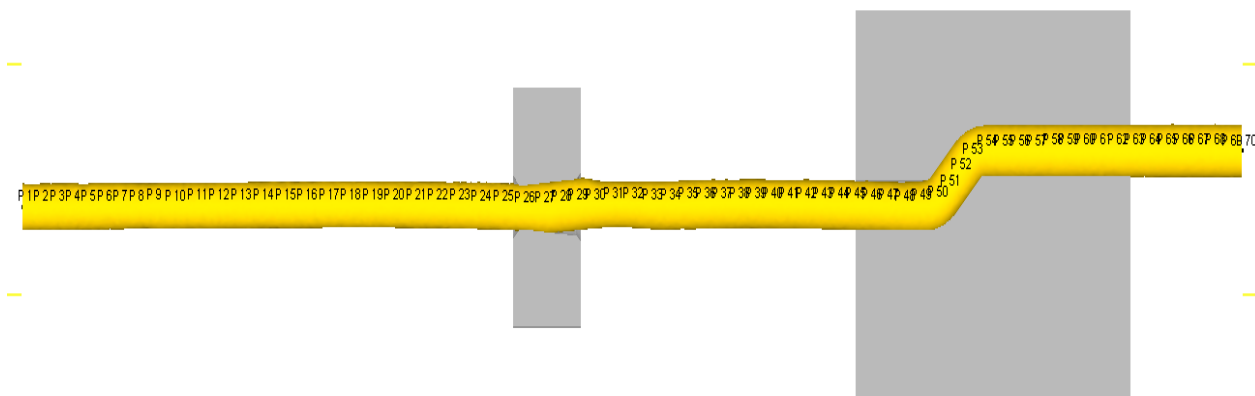


Рисунок 2.13 – Расположение точек для анализа параметров НДС

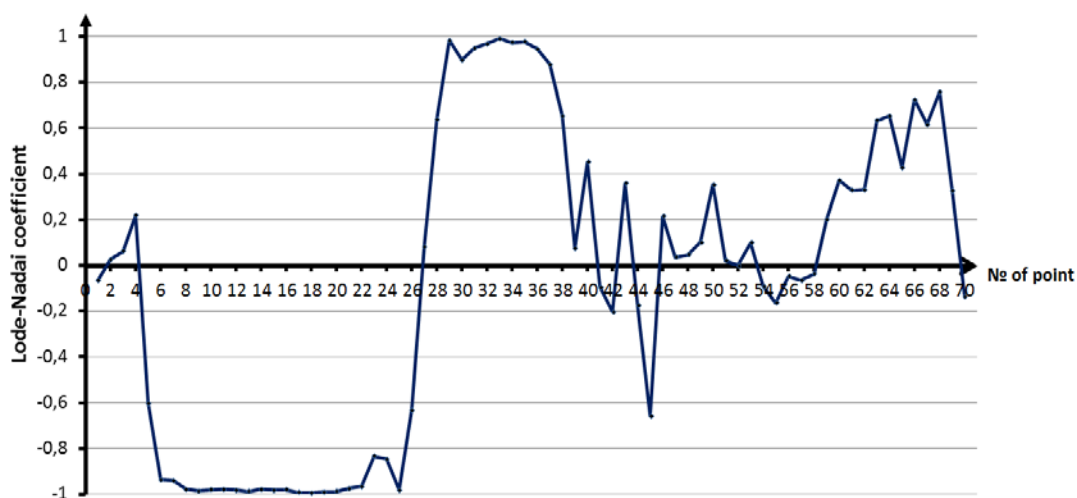


Рисунок 2.14 – Коэффициент Лоде-Надаи

При расчете коэффициента Лоде-Надаи были получены следующие результаты (рисунок 2.14). В первой зоне при прохождении заготовки через канал волокни, в деформируемом металле развивается преимущественно один тип деформации: растяжение ( $\mu = -0,9 \div -1$ ), что является характерным признаком волочения.

Во второй зоне, сразу после очага деформации волокни, характеризующей расстояние между зонами стыков каналов в матрице и волокни, возникает подпор со стороны волокни, даже несмотря на согласование скоростей. В результате растягивающие напряжения значительно снижаются, вплоть до



возникновения зон сжатия ( $\mu = 0,9 \div 1$ ), которые действуют примерно до середины зоны. Вторая половина данной зоны характеризуется резким снижением влияния подпора со стороны волокна, т.к. здесь сжимающие напряжения резко снижаются - величина коэффициента Лоде-Надаи снижается до  $\mu = 0,2 \div 0,4$ .

В третьей зоне, в зоне стыков каналов матрицы, преобладает деформация сдвига ( $\mu = 0 \div 0,2$ ), что является ключевой особенностью РКУ-прессования. В четвертой, хвостовой зоне, возникают деформации сжатия, хотя и не такие интенсивные, как во второй зоне ( $\mu = 0,6 \div 0,8$ ). Это происходит по причине действия заднего подпора на участок заготовки, который находится в матрице лишь частично. В результате, схема всестороннего сжатия возникает лишь на определенной части данной зоны заготовки.

Таким образом, схемы сжатия и сдвига, обеспечиваемые в большей части длины заготовки, гарантируют отсутствие макро- и микротрещин в металле и благоприятствует максимальной степени пластичности деформируемой заготовки.

## 2.2.1 Исследование эволюции микроструктуры

После получения эффективной модели было принято решение о проведении исследований влияния нового непрерывного способа деформирования «прессование-волочение» на эволюцию микроструктуры. Для исследования влияния нового непрерывного способа деформирования «прессование-волочение» на размер зерна металла деформируемой проволоки провели моделируемый эксперимент с помощью программы DEFORM-3D, а точнее, при помощи его вспомогательного модуля MICROSTRUCTURE-3D. Этот модуль позволяет рассматривать эволюцию микроструктуры на каждом шаге деформирования с целью определения необходимого числа циклов деформирования для получения ультрамелкозернистой структуры, не прибегая к реальному эксперименту. Схема работы в модуле MICROSTRUCTURE-3D выглядит следующим образом [78, с. 101].

Готовая просчитанная модель загружается в модуль MICROSTRUCTURE-3D, где она автоматически раскладывается на составляющие её шаги деформирования. После проведения расчета микроструктуры после первого цикла прессования-волочения, заготовка заново задавалась во входной конец матрицы, после чего осуществлялся расчет НДС для второго цикла. Далее просчитанная модель для второго цикла деформирования также загружалась в модуль MICROSTRUCTURE-3D и производился расчет микроструктуры, полученной после второго цикла прессования-волочения и т.д.

Просчет микроструктуры производился путем выбора конкретных точек, как на поверхности заготовки, так и на ее диагональном сечении. В дальнейшем изучение эволюции микроструктуры будет проводиться для выбранных точек, аналогично образцам, вырезанным из разных областей заготовки для приготовления микрошлифов (рисунок 2.15) [6, с. 15].



Рисунок 2.15 – Обозначение точек для наблюдения эволюции микроструктуры

Холодное волочение проволоки сопровождается выделением большого количества тепла и повышением температуры материала в очаге деформации (в волоке). В процессе волочения тепло выделяется из-за внутреннего трения (пластической деформации при волочении, в результате которой происходит трение одних частей металла о другие) и внешнего трения между поверхностями протягиваемого изделия и волочильного инструмента в зоне их контакта.

Около 83 % механической работы, используемой при волочении стальной проволоки, затрачивается на преодоление внутреннего трения, преобразуясь в тепло. В тепло обращается и вся работа внешнего трения. Расчеты показывают, что тепло внешнего трения составляет в среднем около 35 % от всего выделившегося при волочении тепла. Для проволоки разогрев при волочении большого значения не имеет, так как их волочение однократно и непродолжительно [90]. В нашем же случае проводится несколько циклов деформирования, поэтому при исследовании эволюции микроструктуры учитывалась рекристаллизация.

При деформировании возникают 2 типа рекристаллизации – статическая и динамическая, которые влияют на изменение начального размера зерна. Расчет динамической рекристаллизации – это часть модели, которая касается процессов в деформационной зоне. Она начинается, когда эквивалентная деформация  $\varepsilon$  превышает критическую деформацию  $\varepsilon_k$ . Главной величиной данной модели является параметр Зенера-Холломона [91]:

$$Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right), \quad (2.8)$$

где  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ ;

$Q$  – энергия активации, Дж/моль;

$R$  – газовая постоянная = 8,3144 Дж/(моль \* К);

$T$  – температура деформирования, К.

Критическая деформация для начала динамической рекристаллизации:

$$\varepsilon_k = [a_1 \cdot D_0^{a_2} \cdot Z^{a_3} + a_4] \cdot a_5, \quad (2.9)$$

где:  $a_1 \div a_5$  – коэффициенты модели;

$D_0$  – начальный размер зерна, мкм;

Z – параметр Зенера-Холломона.

Деформация при 50 % динамической рекристаллизации:

$$\varepsilon_{50} = [c1 \cdot D0^{c2} \cdot \exp(c3 / T) \cdot \dot{\varepsilon}^{c4}] + c5, \quad (2.10)$$

где: c1 ÷ c5 – коэффициенты модели.

Динамически рекристаллизованная часть:

$$X_{Dyn} = 1 - \exp [f1 \cdot ((\varepsilon - \varepsilon_k) / \varepsilon_{50})^{f2}], \quad (2.11)$$

где: f1, f2 – коэффициенты модели.

Размер зерна после динамической рекристаллизации, мкм:

$$D_{Dyn} = d_1 \cdot Z^{d2}, \quad (2.12)$$

где: d1, d2 - коэффициенты модели.

Расчет статической рекристаллизации – это часть модели, когда исследуемый сегмент заготовки не находится в деформационной зоне. Расчет ведется до тех пор, пока статическая рекристаллизация не прерывается деформационной стадией или фазовым переходом.

Величина деформации после начала динамической рекристаллизации:

$$\varepsilon_m = p2 \cdot (\varepsilon_k + \varepsilon_{50} \cdot \{1 - \exp[-(\varepsilon - \varepsilon_k) / \varepsilon_{50}]\}), \quad (2.13)$$

где: p2 – коэффициент адаптации модели.

Время для 50% статической рекристаллизации, с:

$$t_{50} = g1 \cdot \varepsilon^{g2} \cdot D_0^{g3} \cdot \exp\left(\frac{g4}{T}\right) \cdot \dot{\varepsilon}^{g5}, \quad (2.14)$$

где: g1 ÷ g5 – коэффициенты модели.

Время начала и конца статической рекристаллизации, с:

$$\begin{aligned} t_{05} &= b1 \cdot t_{50} \\ t_{95} &= b2 \cdot t_{50}, \end{aligned} \quad (2.15)$$

где: b1, b2 – коэффициенты модели.

Время паузы для корректировки температуры, с:

$$t_{p\_kor} = \sum \left\{ d_{Ti} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{Q_{ST}}{1000 \cdot R \cdot T} \right) \right] \right\}, \quad (2.16)$$

где:  $d_{Ti}$  – величина приращения времени  $i$ , с;  
 $Q_{ST}$  – энергия активации статической рекристаллизации, Дж/моль.  
 Статически рекристаллизованная часть:

$$X_{Stat} = 1 - \exp[m_2 \cdot (t_{p\_kor}/t_{50})^{m_1}] , \quad (2.17)$$

где:  $m_1, m_2$  - коэффициенты модели.  
 Размер зерна после статической рекристаллизации, мкм:

$$D_{Stat} = [s_1 \cdot \varepsilon^{s_2} \cdot D_0^{s_3} \cdot Z^{s_4}] + s_5, \quad (2.18)$$

где:  $s_1 \div s_5$  - коэффициенты модели.  
 Величина размера зерна после окончания обеих рекристаллизаций:

$$D = X_{Dyn} D_{Dyn} + (1 - X_{Dyn}) X_{Stat} D_{Stat} + [1 - X_{Dyn} - (1 - X_{Dyn}) X_{Stat}] D_0 \quad (2.19)$$

При больших паузах между этапами деформирования, процесс роста зерен начинается сразу после окончания статической и динамической рекристаллизации, когда  $(X_{Dyn} + X_{Stat}) > 95 \%$  и  $(t_{p\_kor} - t_{95}) > 0$ . Новая величина размера зерна  $mKG$  в мкм рассчитывается по формуле:

$$mKG^{w_1} - D^{w_1} = w_2 \cdot (t_{p\_kor} - t_{95}) \cdot \exp[-Q/(RT)], \quad (2.20)$$

где:  $w_1, w_2$  - коэффициенты модели.

Коэффициенты в уравнениях (2.9-2.20) являются индивидуальными для разных материалов и режимов деформирования. Все они подробно рассмотрены в работах [92, 93], где представлено большое количество значений данных коэффициентов для различных марок сталей и сплавов в зависимости от видов деформационных и термических обработок.

При моделировании микроструктуры в программе используется допущение, что заготовка до деформирования имеет равномерную структуру с одинаковым размером зерна в любой точке. В качестве исходного размера был принят средний диаметр зерна 20 мкм.

После расчета модели были получены следующие результаты эволюции микроструктуры (рисунок 2.16). После прохождения каналов матрицы за счет реализации сдвиговой деформации происходит измельчение зерна с 20 мкм до 12 мкм. После стадии волочения размер зерна также изменяется, но менее интенсивно – с 12 мкм до 9 мкм.

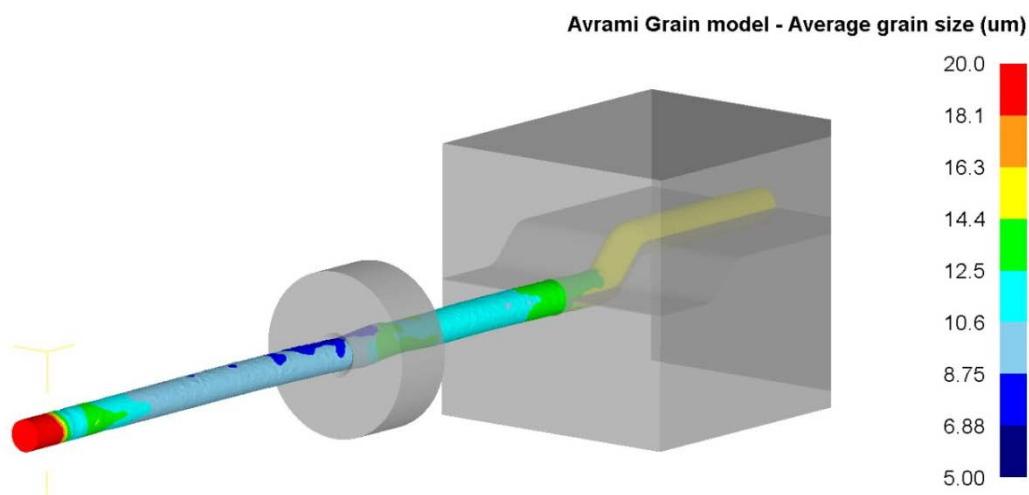


Рисунок 2.16 – Изменение размера зерна

Во время процесса волочения периферийные слои подвергаются большим деформациям сдвига в продольном направлении, чем центральные. Поэтому после окончания процесса волочения периферийные слои вследствие упругого последействия укорачиваются больше, чем центральные. Целостность металла выравнивает эти укорочения, поэтому неизбежно появление остаточных напряжений, растягивающих в периферийных и сжимающих в центральных слоях сплошного круглого протянутого прутка.

Центральные слои заготовки во время обеих стадий деформирования прорабатываются менее интенсивно – здесь размер зерна меняется с 20 мкм до 15 мкм после РКУ-прессования и до 13 мкм после волочения. Таким образом, после одного цикла деформирования, разница значений размера зерна между поверхностной и центральной зоной составляет 4 мкм (рисунок 2.17).

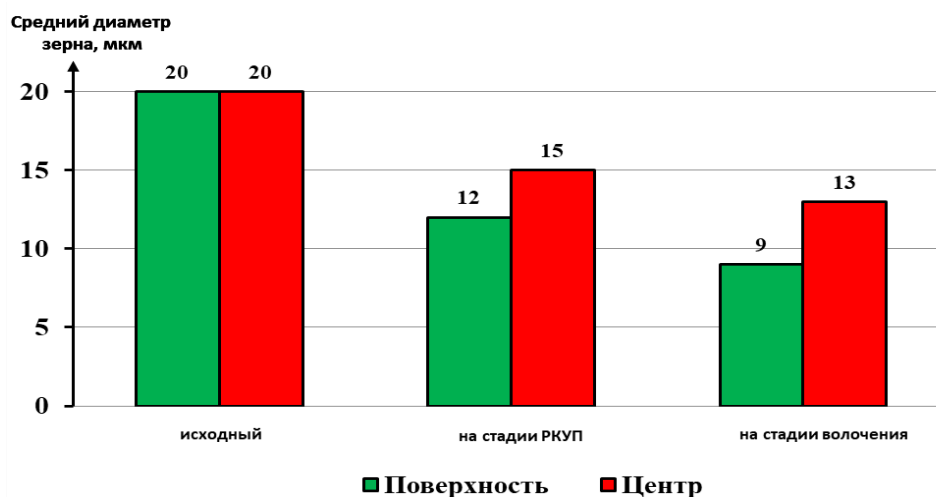


Рисунок 2.17 – Результаты расчета эволюции микроструктуры

Это позволяет сделать вывод, что при осуществлении данного совмещенного процесса проработка структуры заготовки по сечению

осуществляется неравномерно, и для выравнивания свойств по сечению необходимо проводить несколько циклов деформирования.

Многопроходное деформирование осуществлялось при следующих условиях:

– 1-ый проход: заготовка диаметром 7,0 мм проходила через матрицу с диаметром канала 7,0 мм и далее подвергалась волочению через волоку диаметром 6,5 мм;

– 2-ой проход: заготовка диаметром 6,5 мм проходила через матрицу с диаметром канала 6,5 мм и далее подвергалась волочению через волоку диаметром 6,0 мм;

– 3-ий проход: заготовка диаметром 6 мм проходила через матрицу с диаметром канала 6,0 мм и далее подвергалась волочению через волоку диаметром 5,5 мм.

В результате были получены следующие данные (рисунок 2.18). После второго прохода измельчение зерна уже не такое интенсивное, как в первом проходе. Здесь средний диаметр зерна после РКУП в поверхностной зоне составил 5 мкм, в центральной зоне – 8 мкм, т.е. разница составила 3 мкм. После волочения размер зерна в поверхностной зоне составил 4 мкм, в центральной зоне – 6 мкм - разница составила 2 мкм.

После третьего прохода средний диаметр зерна после РКУП в поверхностной зоне составил 2 мкм, в центральной зоне – 3 мкм, т.е. разница составила лишь 1 мкм. После волочения размер зерна в поверхностной зоне составил 1 мкм, в центральной зоне – 2 мкм – разница также составила 1 мкм.

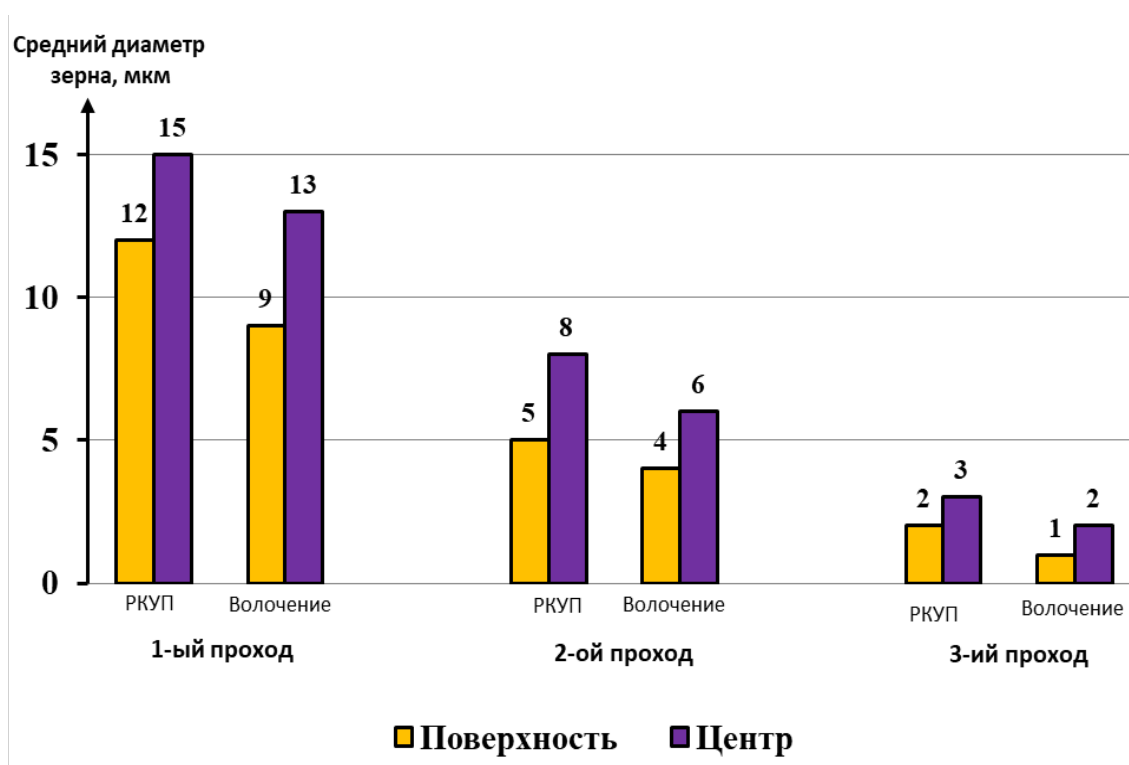


Рисунок 2.18 – Изменение размера зерна при многопроходном деформировании

Таким образом, в результате изучения модели с несколькими циклами деформирования было выявлено, что с увеличением числа проходов происходит не только общее снижение среднего диаметра зерна, но и постепенное выравнивание данного параметра между центральной и поверхностной зоной.

Для выявления преимуществ предлагаемой технологии по сравнению с действующей технологией традиционного волочения было проведено моделирование изменения размера зерна проволоки за три прохода волочения. Исследование размера зерна также проводилось на поверхности и в центральном сечении проволоки, полученные данные приведены на рисунке 2.19.

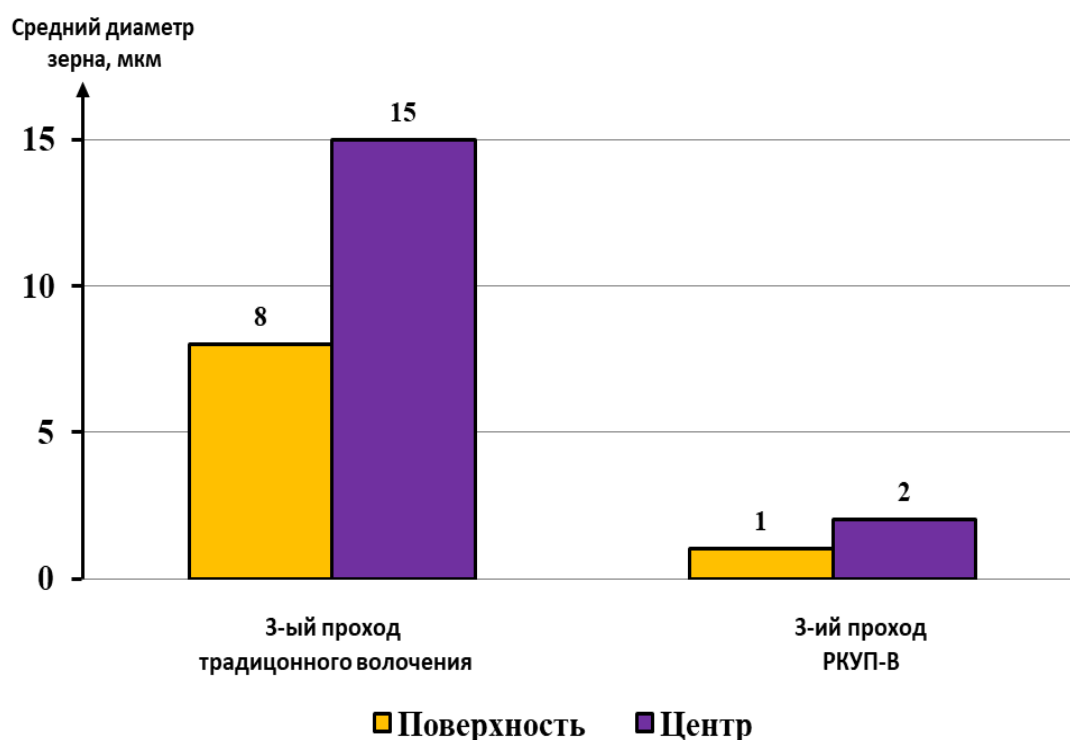
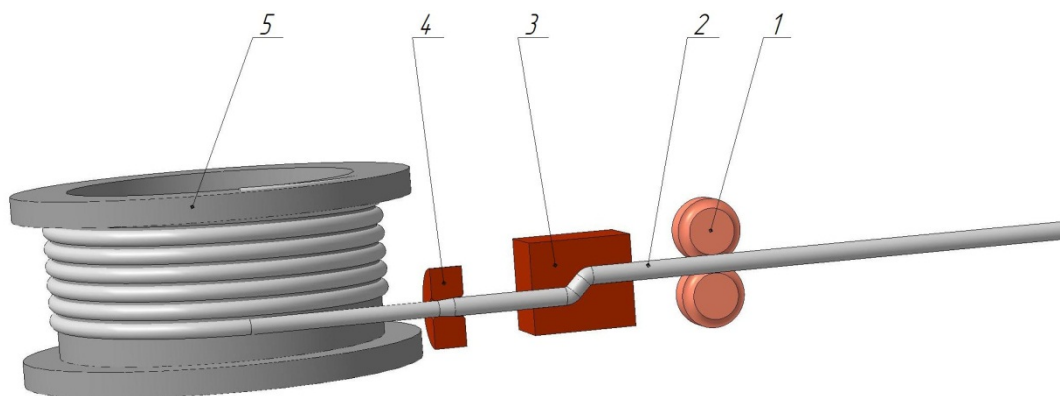


Рисунок 2.19 – Изменение размера зерна после 3-х проходов деформирования

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что предлагаемый совмещенный способ деформирования прессование-волочение обладает существенным преимуществом по сравнению с традиционным волочением. Данный способ деформирования, приведенный на рисунке 2.20, за счет совмещения двух способов: интенсивной пластической деформации в равноканальной ступенчатой матрице и процесса волочения, позволяет получать проволоку требуемых размеров и формы поперечного сечения, обладающую ультрамелкозернистой структурой. При этом снимаются ограничения по длине исходной заготовки, а длина готовых изделий может достигать нескольких десятков метров.





1 – задающее устройство; 2 – проволока; 3 – равноканальная ступенчатая матрица; 4 – волока в волокодержателе; 5 – барабан наматывающий

Рисунок 2.20 – Схема совмещенного процесса «прессование-волочение»

Суть предлагаемого способа деформирования заключается в следующем. Предварительно заостренный конец проволоки задается в равноканальную ступенчатую матрицу, а затем последовательно в калибрующую волоку (по своей сути процесс задачи металла не отличается от задачи проволоки в волоку при стандартном процессе волочения). После того, как конец заготовки выйдет из волоки, он закрепляется с помощью захватывающих клещей и наматывается на барабан волочильного стана. В данном случае процесс протягивания заготовки через равноканальную ступенчатую матрицу и калибрующую волоку реализуется за счет приложения к концу заготовки вытягивающей силы. Внешнюю нагрузку прикладывают к протягиваемому металлу, и на поверхности контакта металл - инструмент возникают контактные напряжения. В отличие от других способов обработки материалов давлением, реализация которых не может быть осуществлена без присутствия контактных сил трения, при волочении на разделе металл-инструмент, направленные против движения металла, являются негативными явлениями процесса, что, несомненно, подразумевает использование технологических смазок, уменьшающих трение [94].

### 2.2.2 Изучение усилий деформирования

Для реализации совмещенного процесса «прессование – волочение» необходимо чтобы соблюдалось условие: усилие необходимое для осуществления совмещенного процесса «прессование – волочение» ( $P_{\text{волоч}} + P_{\text{пресс}}$ ) должно быть меньше силы создаваемой двигателем волочильного стана при наматывании проволоки на барабан. Для соблюдения данного условия был проведено моделирование усилия прессования в равноканальной ступенчатой матрице и волоке.

При изучении усилий РКУ-прессования и волочения было принято решение построить дополнительные модели с различными скоростями деформирования. Такое решение было принято ввиду того, что ранее проведенные исследования таких процессов, как прессование в матрицах различных конструкций, совмещенные процессы «прокатка-прессование», «винтовая прокатка-прессование» [48, с. 196; 92-93] показали, что скорость деформации оказывает незначительное влияние на НДС заготовки и эволюцию микроструктуры, но в то же время значительно влияет на возникающее усилие деформирования. В качестве значений скоростей деформации были приняты действующие значения скоростей волочения на волочильном стане. Скорости прессования были установлены в соответствии с согласованием скоростей в 1,16 раз меньше скоростей волочения (таблица 2.2). Все остальные параметры базовой модели оставались неизменными.

Таблица 2.2 – Значения скоростей волочения

Скорость	1-ая скорость	2-ая скорость	3-я скорость	4-ая скорость
Волочения, м/с	1,5	2,35	3,93	5,2
РКУП, м/с	1,29	2,0	3,39	4,48

В итоге были построены сводные графики усилия РКУ-прессования (рисунок 2.21) и волочения (рисунок 2.22).

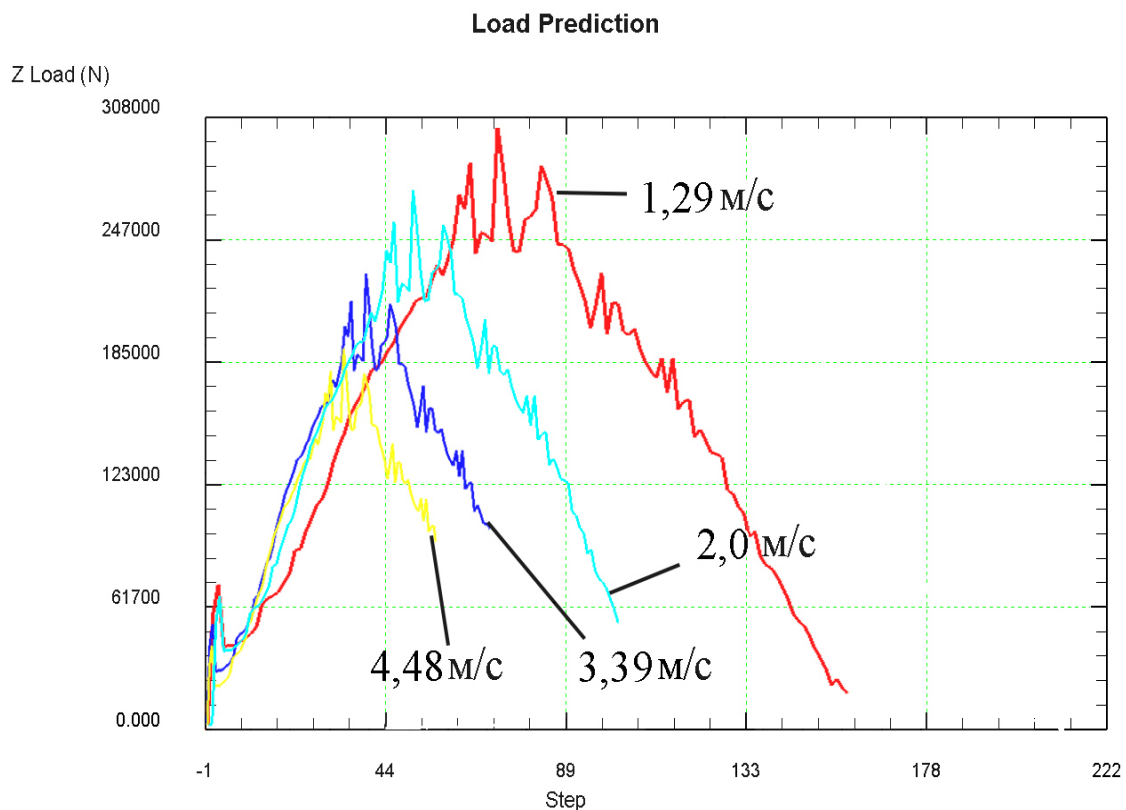


Рисунок 2.21 – Усилие при РКУП

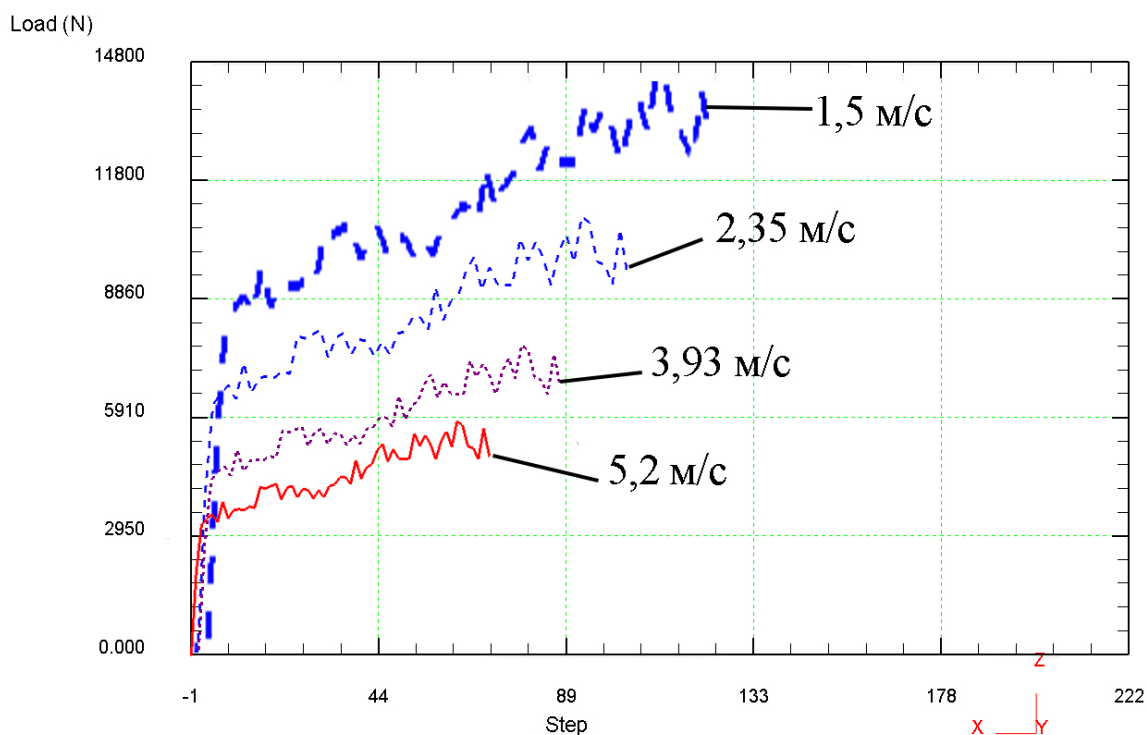


Рисунок 2.22 – Усилие при волочении

Анализируя полученные результаты, отчетливо видно, что с увеличением скорости деформации усилие деформирования (как при РКУ-прессовании, так и при волочении) снижается. При этом характер кривых в вертикальном направлении в обоих случаях остается неизменным, изменяется лишь их уровень. Причиной этому является тот факт, что в рассматриваемых моделях изменялся лишь один параметр – скорость деформации. В горизонтальном направлении их характер изменяется в обратной зависимости: при увеличении скорости деформации протяженность графиков уменьшается, что является вполне логичным – при увеличении скорости деформации и неизменной длине заготовки, время деформирования уменьшается.

На стадии РКУ-прессования усилие деформирования снижается с 308 кН (при скорости 1,29 м/с) до 190 кН (при скорости 4,48 м/с). На стадии волочения усилие деформирования снижается с 14,7 кН (при скорости 1,5 м/с) до 5,8 кН (при скорости 5,2 м/с).

Для многих сортов проволоки из низкоуглеродистых сталей, цветных металлов и сплавов, а также для проволоки, предназначенной для последующего волочения на более тонкие диаметры, ограничение скоростей волочения обуславливается только исключительно природой металла и качеством проведения технологических операций, составляющих весь комплекс производства проволоки [90].

В диапазоне скоростей волочения сопротивление деформации металла мало зависит от скорости деформации, так как она не влияет на наклеп металла. Однако при волочении с высокими скоростями могут значительно изменяться контактные условия трения, а механическая работа, затрачиваемая на

преодоление сопротивления деформации и внешних сил трения, может почти полностью переходить в тепло, нагревающее инструмент и металл. С ростом температуры металла его сопротивление деформации снижается, поэтому сила волочения может уменьшаться. Но для ряда металлов повышение температуры может вызвать протекание процессов старения металла или закалки (для некоторых марок стали), что приведет к снижению пластичности металла, росту его прочности, увеличению износа волок и возрастанию силы волочения [97]. Поэтому, исходя из вышесказанного, для получения более мелкозернистой структуры и повышенных прочностных характеристик выберем минимально возможную скорость для используемого волочильного стана, то есть 1,5 м/с, следовательно, скорость прессования будет 1,1 м/с.

## **Выводы**

За последнее время были достигнуты большие успехи в области моделирования эволюции микроструктуры металлических материалов. Тем не менее, моделирование не в состоянии решить все многообразие существующих сейчас процессов. Так как модели, заложенные в программу, как правило, применяются только к конкретным распространенным технологическим процессам. И структура, которая задается первоначально, бывает, далека от реальной структуры образцов. Несмотря на вышесказанное, при моделировании было установлено, что использование в процессе «прессование-волочение» равноканальной ступенчатой матрицы благоприятно влияет не только на структуру, но и на схему всестороннего сжатия в большей части матрицы, обеспечивающую отсутствие макро- и микротрещин в металле и благоприятствующую максимальной степени пластичности деформируемой заготовки в матрице, а затем и волоке.

В результате моделирования, разработанного процесса в программном комплексе Deform-3D, установлено, что для обеспечения безобрывности процесса необходима задача разных скоростей деформации в волоке и равноканальной ступенчатой матрице. Проведена оценка равномерности НДС при совмещении процесса РКУП и волочения. В результате исследования напряженно-деформированного состояния выявлено, что:

- в очагах деформации преобладает схема сдвига;
- накопленная степень деформации достигает  $\epsilon = 2,5...3$  единиц, что прогнозирует получение образцов с высокими механическими свойствами;
- показана эффективность совмещенного процесса с точки зрения понижения усилия деформирования.

На основании анализа НДС при прессовании и волочении показана возможность обеспечения деформаций сдвига в обрабатываемом металле при комбинировании деформаций растяжения, сжатия и изгиба. В результате сдвиговых деформаций получена ультрамелкозернистая структура.

Проведя анализ полученных данных можно с уверенностью сделать вывод о возможности реализации процесса «прессование-волочение». Данный способ

деформирования за счет совмещения интенсивной пластической деформации в равноканальной ступенчатой матрице и процесса волочения через волоку позволит получать проволоку с ультрамелкозернистой структурой, требуемых размеров и формы поперечного сечения при незначительном количестве циклов деформирования, а так же снимет ограничения по длине исходной заготовки, и, следовательно, позволит получать готовые изделия длиной до нескольких десятков метров [99].

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 3.1 Выбор материалов для исследования

Проволока представляет металлическое длинномерное изделие, которое используется во многих областях электротехники, машиностроения и строительства. Так как проволока считается метизным изделием, то ее производят почти все метизные заводы в больших количествах.

Одним из важнейших метизов является стальная проволока, широко используемая как конструктивный элемент при производстве канатов, биметаллической сталемедной проволоки, неизолированных проводов и т.д. Данные металлоизделия определяют безопасность и надежность функционирования железных дорог, несущих строительных конструкций, телефонных проводов, кабелей, объектов оборонной промышленности, авиации и т.д. Основными показателями качества указанных металлоконструкций являются их надежность и долговечность, определяемые, главным образом, прочностными свойствами стальной проволоки. Основными свойствами проволоки (временное сопротивление разрушению, пределы текучести и усталости, износостойкость, вязкость), как конструкционного материала, являются структурно-чувствительными, то есть могут управляться посредством целенаправленного изменения структуры.

Основным химическим элементом, определяющим поведение стали при волочении, является углерод. Увеличение содержания углерода ведет к повышению прочности и снижению пластичности проволоки, при этом существенно понижается стойкость деформирующего инструмента, увеличивается величина и количество дефектов (трещин, рванин и т. д.), ухудшается оформление изделий. Поэтому для исследования выбрана углеродистая сталь марки Ст3, широко применяемая в условиях холодного климата. Химический состав стали Ст3 представлен в таблице 3.1.

Выбор дешевой, широко распространенной марки стали обусловлен тем, что после улучшения структуры и повышения механических свойств ей можно будет заменить более дорогие, но схожие по характеристикам легированные марки сталей.

Таблица 3.1 – Химический состав стали Ст3, ГОСТ 380 – 2005

Сплав	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Ni	Cr	N	Cu	As	S,P	Fe
Ст3	0,20	0,15	0,65	0,2	0,25	0,008	0,25	0,08	0,025	основа

Следующим материалом для исследования выбрана технически чистая медь марки М1. Основное преимущество меди перед другими цветными металлами – низкий коэффициент трения, сочетающийся с высокой

пластичностью и хорошей стойкостью против коррозии в ряде агрессивных сред и хорошей электропроводностью. Также медь хорошо обрабатывается давлением в холодном состоянии. При такой обработке суммарные обжатия могут достигать 90% и выше [100].

Медь характеризуется отсутствием полиморфных превращений, что делает ее идеальным модельным материалом для установления особенностей холодной деформации при разработке новых схем деформирования [101]. Поэтому для эталонного модельного материала используем технически чистую медь, химический состав которой представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Химический состав меди марки М1, ГОСТ 859-2001

Сплав	Массовая доля элементов, %			
	Cu	Fe	Zn	O
М1	99,94	0,005	0,004	0,051

Алюминий и его сплавы, благодаря своим уникальным технико-эксплуатационным характеристикам, занимают важное место в современной промышленности. Наличие таких свойств, как высокая электропроводность и коррозионная стойкость в сочетании с небольшим весом, привели к тому, что алюминий и его сплавы нашли широкое применение в машиностроении, электроэнергетике, транспорте, авиации и других отраслях промышленности. Особое место в структуре производства полуфабрикатов из алюминия и его сплавов занимает проволока, которая применяется для изготовления линий электропередач, электротранспортных тросов, кабелей, электродов, присадочных прутков, сварочной проволоки и др. Данная продукция так же широко применяется в военной, космической и авиационной промышленности. Материалом изготовления алюминиевой проволоки в основном является чистый алюминий 99.99% (таблица 3.3). Алюминиевая проволока хорошо поддается обработке, на воздухе покрывается антикоррозионной пленкой, тем самым становясь устойчивой к воздействию внешней среды, также она весьма пластична.

Таблица 3.3 – Химический состав алюминия марки А0, ГОСТ 11069 - 2001

Сплав	Si	Mg	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
А0	0,8	0,05	0,05	0,05	0,1	0,01	основа

Уже несколько десятилетий в производстве алюминиевой проволоки большое внимание уделяется к повышению ее качества, путем достижения повышенного уровня ее механических свойств, в том числе, и за счет получения ультрамелкозернистой структуры.



## 3.2 Методика проведения исследований

Для выявления результатов эксперимента необходимо провести ряд испытаний для изучения механических характеристик и микроструктуры полученной проволоки. Необходимо зарегистрировать изменения микроструктуры, возникающие при деформации проволоки и сравнить с ранее изученными способами получения проволоки. Затем необходимо провести механические испытания – такие как испытания, на растяжение, микротвердость – для выявления изменений прочностных и пластических характеристик проволоки после каждой обработки.

### 3.2.1 Подготовка образцов для исследований

#### 3.2.1.1 Подготовка образцов для изучения микроструктуры

Предпосылкой для всех металлографических исследований является изготовление шлифов, которые могут быть использованы для микроскопического исследования с помощью светового и электронного микроскопов, для определения микротвердости, а также для количественного измерения структурных составляющих. Правильное изготовление шлифов имеет очень важное значение, так как от этого зависит правильность толкования микроструктуры [102].

Получаемую проволоку рассматривали в поперечном (плоскость  $YZ$ ) и продольном (плоскость  $XZ$ ) сечениях. Общая схема вырезки образцов для металлографических исследований приведена на рисунке 3.1. Зеленым цветом помечены плоскости, используемые для микроструктурного исследования.

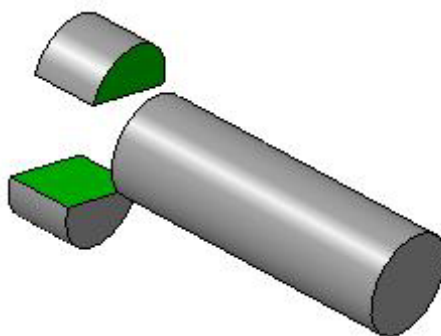


Рисунок 3.1 – Схема вырезки темплетов для подготовки микрошлифов

Операция вырезки образцов из проволоки производится с помощью отрезного станка Lobotom-3, который является высокоточным отрезным станком. Абразивное мокрое отрезание обеспечивает минимум повреждений поверхности, что облегчает и ускоряет дальнейшую подготовку образцов. Для получения требуемой поверхности, вырезанный образец из проволоки подвергают специальной обработке. Так как образцы из проволоки имеют

небольшие размеры, то для облегчения обработки их заливают специальной эпоксидной смолой. Перед заливкой на пластмассовую крышку устанавливают круглую оправку из пластмассы и внутрь оправки помещают образец таким образом, чтобы подготавливаемая поверхность примыкала к пластинке, затем жидкую массу смолы заливают в оправку [103]. Далее образцы, залитые эпоксидной смолой, шлифуют с помощью крупной шкурки с целью удаления верхнего слоя эпоксидной смолы и получения более ровной поверхности. Первоначально шлифование шкуркой осуществляют на плоском основании с целью удаления больших рисок. Далее образцы шлифуются на шлифовально-полировальном станке Tegra Pol – Tegra Force фирмы Struers, с применением шлифовальных и полировальных дисков по методике, предложенной данной фирмой [104]. Для получения качественной поверхности микрошлифа при шлифовании последовательно переходили от одного диска к другому с непрерывно уменьшающимися размерами абразивных частиц. При уменьшении размеров абразивных частиц снижается глубина рисок на поверхности и уменьшается толщина деформированного поверхностного слоя, получаемого в результате шлифования. Во избежание вдавливания в поверхность образца абразивных частиц шлифование осуществлялось под постоянной струей воды [6, с. 23].

После шлифования поверхности образца следовало полирование, которое полностью устранило риски, оставшиеся от воздействия абразивных частиц. Далее микрошлифы травят в специальном травящем растворе.

Травители приготовлены в соответствии с рекомендациями [105] и по ГОСТ 5639, для стали при выявлении структуры перлита и феррита использовали четырехпроцентный раствор азотной кислоты в этиловом спирте (4%  $\text{HNO}_3$ ).

Для травления меди был выбран раствор хлорного железа с соляной кислотой  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , смешанных из соотношения 1:20:100 [106]. Раствор предназначен для выявления границ зерен меди, латуни, бронзы и сложных сплавов.

Для алюминия, в качестве травителя, использовалась смесь взятая в равных пропорциях из плавиковой, азотной кислоты и глицерина.

В результате, на поверхности микрошлифа образуется рельеф и при наблюдении под микроскопом более сильно растворившиеся участки из-за тени или более низкого коэффициента отражения представляются более темными, а нерастворившиеся более светлыми [107].

### 3.2.1.2 Подготовка образцов для механических исследований

Для определения прочностных и пластических характеристик образцов необходимо провести ряд механических испытаний: на растяжение и определение микротвердости. Для каждого вида механических испытаний требуются образцы определенных размеров и формы, установленные стандартами.

Для определения механических свойств, ресурса пластичности и сопротивления пластической деформации, проведены испытания на растяжение проволоки диаметром 5 мм из испытуемых марок металлов после деформирования по исследуемым технологиям. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 10446-80 «Проволока. Метод испытаний на растяжение» и ГОСТ 1497-2000 «Металлы. Метод испытаний на растяжение». Настоящие стандарты устанавливают методы испытания на статическое растяжение при температуре 20°C проволоки из металлов и их сплавов диаметром или максимальным размером поперечного сечения, не превышающим 16 мм круглого сечения [108].

В качестве образцов для испытаний использовали отрезки проволоки с начальной расчетной рабочей длиной  $l_0=100\pm 0,1$  мм, ограниченной с погрешностью до 1 % рисками. Для пересчета удлинения с отнесением места разрыва к середине расчетной длины наносили царапинами отметки по всей рабочей длине образца через равные промежутки. Полная длина образца включала участки для закрепления его в зажимах разрывной машины. Перед испытанием проводили правку образцов, которая не оказывала влияния на состояние поверхности и форму сечения проволоки [108].

Начальную площадь поперечного сечения проволоки определяли в средней части образца как среднее арифметическое от измерений диаметра проволоки в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Измерение проводилось микрометром с точностью 0,01 мм.

Для получения статистически надежных результатов было испытано не менее 3 образцов для каждого исследуемого состояния.

Твердость полученной проволоки определяли методом микротвердости, который позволяет определить твердость фаз и структурных составляющих многокомпонентных сплавов и дает возможность решать вопросы, связанные с влиянием отдельных составляющих на упрочнение.

Подготовленный образец, который берется для удобства, после металлографических исследований, устанавливается на предметный столик, так чтобы исследуемая поверхность была параллельна плоскости столика и обращена вверх. Полученные значения микротвердости снимаются с панели прибора.

### 3.2.2 Металлографический анализ

Микроструктурный анализ проводили методами растровой (РЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

#### 3.2.2.1 Растровая электронная микроскопия

Метод растровой электронной микроскопии проводили на сканирующем (растровом) электронном микроскопе JSM 5910 и использовали в основном для проведения фрактографических исследований разрушенных образцов, а также

для исследования морфологических особенностей структуры образцов. Отличительной особенностью данной методики является большая глубина резкости изображения (фокуса), что позволяет получить лучшие изображения, чем в оптическом микроскопе. Результаты этих исследований позволили получить обоснованные представления о характере пластической деформации и разрушения исследуемых образцов, а также связать процессы разрушения со структурными особенностями исследуемых металлов. Микроскоп также предназначен для изучения сверхтонкой структуры на уровне кристаллографических плоскостей, поэтому исследование морфологических особенностей структуры (форма и размеры карбидов, размеры ферритных, перлитных зерен, толщина пластин цементита и межпластиночное расстояние в перлите) оценивали непосредственно на этом приборе. Увеличение микроскопа составляет от 18 до 100 000 крат [109].

### 3.2.2.2 Просвечивающая электронная микроскопия

Электронно-микроскопические исследования были проведены на просвечивающем микроскопе JEM-2100 фирмы Jeol при ускоряющем напряжении 200 кВ в диапазоне увеличений от 1000 до 50000 крат. Основными достоинствами используемого метода являются возможность изучения тонких деталей структуры, количественных измерений параметров тонкой структуры и возможность визуального восприятия сложной реальной структуры деформированного материала.

Из массивных образцов на станке с водяным охлаждением вырезали пластинки толщиной 0,3 мм на высокоточном отрезном станке Accutom 5 фирмы Struers, которые утоняли вначале механическим шлифованием на абразивной бумаге разной зернистости до толщины 0,07-0,08 мм. Дальнейшее утонение фольги производилось при комнатной температуре методом электролитического полирования на стандартной установке в электролите при напряжении 25 В до появления отверстия. Полученные фольги изучали на просвет в электронном микроскопе JEM2100 в светлом и темном поле.

Средний размер зерен/субзерен определяли по светлопольным и темнопольным изображениям методом подсчета пересечений зерен по ГОСТ 21073.3-75. Плотность дислокаций определяли по числу точек выходов дислокаций на поверхность фольги по формуле [110]:

$$\rho = n_T M / F, \quad (3.1)$$

где  $n_T$  – число пар точек выходов дислокаций на поверхность фольги;

$M$  – это увеличение;

$F$  – площадь фотографии.

### 3.2.2.3 Метод дифракции обратноотраженных электронов

Одной из областей применений растровой электронной микроскопии является дифракционный метод исследования, заключающий в автоматизированном систематическом пошаговом измерении кристаллографической ориентировки микрообластей плоского полированного образца с последующим построением карт пространственного распределения ориентировок.

Метод дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) позволяет определять углы разориентировки между зернами, представлять данные в виде массива углов и размеров, прямых и обратных полюсных фигур, а также выявить границы и субграницы зерен.

Поэтому с целью более объективной интерпретации зеренной структуры по сравнению с ПЭМ проводили EBSD анализ при помощи РЭМ Philips XL-30 с полевым катодом. Ускоряющее напряжение 20 кВ. Для обработки результатов использовали программное обеспечение Tex SEM Lab. Разориентировку вычисляли между соседними (смежными) точками сканирования. Размеры шага сканирования были предварительно определены из областей измерения и ожидаемых размеров зерен или субзерен. Сканирование проводилось на участках размером 50 мкм × 50 мкм с шагом 0,2 мкм. Различные разориентации между зернами были установлены с использованием минимального разрешения разориентации 2°. Ввиду экспериментальной погрешности EBSD метода все малоугловые границы с разориентировкой меньше 2° были исключены из рассмотрения. Все отсканированные опорные точки с индексом достоверности ~ 0.1 были исключены из наборов, данных для улучшения общей точности изображений. Цвета зерен на карте соответствуют ориентациям, указанным в стереографическом треугольнике. Таким образом, разные цвета в соседних зернах соответствуют разориентации между этими двумя зернами более чем на 2°. Границы зерен обозначаются либо белыми линиями, соответствующими малоугловым разориентациям 2-15°, либо черными линиями, соответствующими высокоугловым разориентациям > 15°. Доля проиндексированных дифракционных картин составляла 98% от общего числа измеренных точек. На всех картах EBSD неиндексированные точки удалены при проведении стандартной восстановительной (clean-up) процедуры. Поверхность образцов для съемки готовилась с помощью струйной полировки на приборе Tenipol-3 [111].

### 3.2.3 Механические испытания образцов

#### 3.2.3.1 Методика измерения твердости

Твердость – это сопротивление материала проникновению в него другого, более твердого тела. Для испытаний стальной проволоки был выбран метод по Бринеллю, так как этот метод рекомендуется применять для металлов

твёрдостью не более HB 450 (4500 МПа), поскольку шарик может деформироваться, что исказит результаты испытаний.

Испытания по Бринеллю (ГОСТ 9012-83) проводятся путем вдавливания в металл стального шарика. В результате на поверхности металла образуется сферический отпечаток.

Диаметр шарика и нагрузку устанавливают в зависимости от исследуемого металла, его твёрдости и толщины. При испытании стали  $D = 2,5$  мм и  $P = 6,25$  кН (625 кгс).

Микротвёрдость определяли помощью LEICA DM IRM HC – инвентарный микроскоп для испытаний материалов, оснащённый приставкой для определения микротвёрдости отдельных фаз, приставкой для автоматической микрофотосъёмки микроструктуры, а также оригинальным программным обеспечением для определения балла зерна и количества фаз в соответствии с ГОСТ 9450-76 [112]. Использовали метод вдавливания алмазной пирамидки с углом между противоположными гранями  $136^\circ$  под нагрузками  $P = 0,2$  Н для алюминия; 1 Н для стали и 0,5 Н для меди. Шаг измерений устанавливали на недеформированном образце в пределах от 0,05 до 0,5 мм в зависимости от твёрдости материала, величины прилагаемой нагрузки и расстояния от границы соединения.

### 3.2.3.2 Испытания на одноосное растяжение

Механические испытания образцов были проведены на электромеханической измерительной системе для проведения статических испытаний Instron 5982.

По результатам испытаний были определены значения условного предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), временного сопротивления разрыву ( $\sigma_B$ ) и относительного удлинения образца после разрыва ( $\delta$ ).

Конечную длину образца ( $l_k$ ) на расчетной длине измеряли с точностью  $\pm 0,1$  мм. Диаметр образца после разрыва определяли на инструментальном микроскопе как среднее арифметическое диаметров в двух взаимно перпендикулярных направлениях в поперечном сечении образца в месте разрыва. Диаметр в конце равномерного удлинения определяли как среднее арифметическое 5 значений диаметра образца после разрыва в пределах расчетной длины вне области шейки. Измерение проводили микрометром с точностью 0,01 мм [108]. Внешний вид проволоки после испытаний на растяжение представлен на рисунке 3.2.

Испытание образцов считается недействительным при разрушении образца по ранее имеющимся дефектам (расслои, трещины, раковины).



Рисунок 3.2 – Образцы стали Ст.3 после испытания на растяжение

### 3.2.3.3 Испытания проволоки на перегиб

Испытание на перегиб применяется для круглой проволоки диаметром от 0,5 мм до 10,0 мм и фасонной проволоки с соответствующими этим диаметрам площадями поперечных сечений. Испытание на перегиб служит для определения способности проволоки из черных и цветных металлов и их сплавов подвергаться пластической деформации при перегибах. Испытание на перегиб проволоки проводят при температуре  $20 \pm 10^\circ\text{C}$  по ГОСТ 1579-93 [6, с.29].

Испытание на перегиб заключается в многократном перегибе на  $90^\circ$  от исходного положения в одну и другую сторону образца, закрепленного с одного конца в зажимах прибора, через цилиндрический валик заданного радиуса. Первым перегибом считается загиб образца на  $90^\circ$  от вертикали в любую сторону (вправо или влево); вторым перегибом считается загиб на  $180^\circ$  в сторону противоположную предыдущими перегибу и т.д. Испытание не должно прерываться между последовательными перегибами [6, с.30].

В качестве образцов для проведения испытания применяли отрезки проволоки. Длина образца проволоки составляла 100-150 мм.

Испытание проводили до появления растрескивания, видимого невооруженным глазом. Последний перегиб, на котором произошло разрушение образца, в расчет не принимался.

Испытание на перегиб проводили на приборе, представленном на рисунке 3.3.

Параметры прибора по ГОСТ 1579-93 для проволоки диаметром 5,0-6,0 мм следующие: диаметр валиков 15 мм, диаметр отверстия поводка 6 мм, расстояние от верхней образующей цилиндрического валика до нижней поверхности поводка – 50 мм; для проволоки 6,5-7,0 мм диаметр валиков 20 мм,



диаметр отверстия поводка 8 мм, расстояние от верхней образующей цилиндрического валика до нижней поверхности поводка 75 мм [5, с.31].

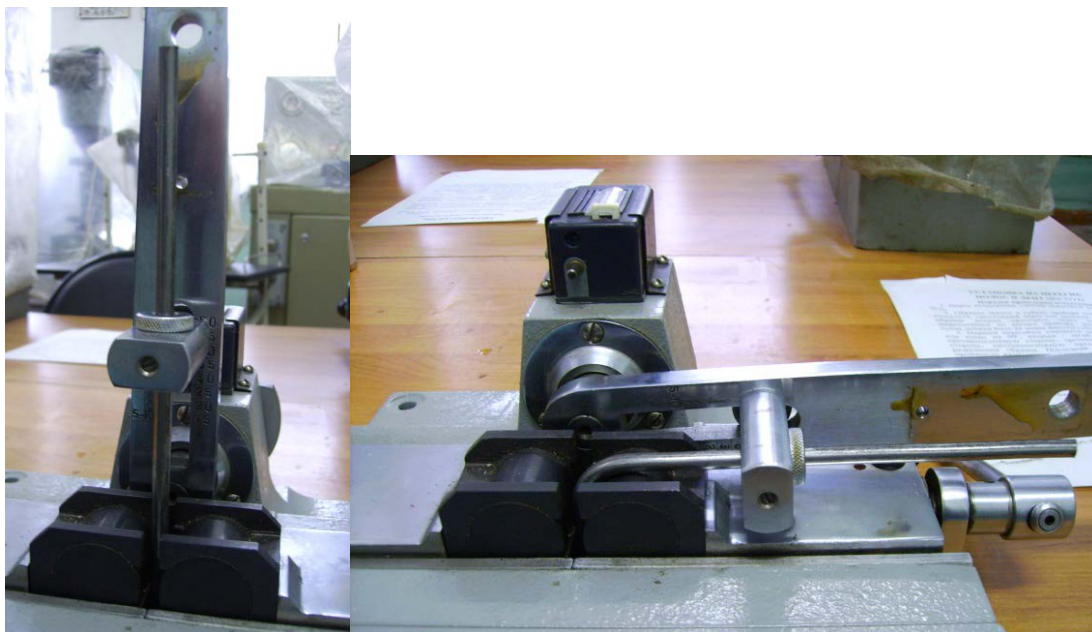


Рисунок 3.3 – Установка для проведения испытаний на перегиб

## Выводы

Для изучения влияния процесса «прессование-волочения» на структуру и механические свойства проволоки в настоящей работе, в качестве материалов для исследования были выбраны следующие металлические сплавы:

- углеродистая сталь марки Ст3, широко используемая как конструктивный элемент при производстве канатов, металлокорда и биметаллической сталемедной продукции;

- медь марки М1, которая характеризуется отсутствием полиморфных превращений, что делает ее идеальным модельным материалом для установления особенностей холодной деформации при разработке новых схем деформирования. Также медная проволока по своим эксплуатационным свойствам уступает только серебру, которое значительно дороже;

- алюминий марки А0, который является по своим техническим характеристикам основным металлом, используемым для замены меди. Целесообразность такой замены обуславливается неограниченными запасами алюминия в природе, его дешевизной, легкостью и сравнительно высокой электропроводностью.

Также выбранные металлы обладают совершенно отличными по своей природе свойствами, что делает их идеальными модельными материалами для изучения новой технологии. Так сталь марки Ст.3, представляет собой механическую смесь с температурой плавления выше 1000°С (ОЦК решетка),



алюминий марки А0 с температурой плавления 660°С (ГЦК решетка) и медь марки М1 с температурой плавления 1083°С (ГЦК решетка). Кроме этого данные материалы характеризуются разным развитием рекристаллизационных процессов. В стали температура рекристаллизации гораздо выше, чем в других металлах. Медь имеет низкую температуру рекристаллизации за счет низкой энергии дефектов упаковки, которая облегчает развитие двойникования, а алюминий наоборот, имеет очень высокую энергию дефектов упаковки, что затрудняет рекристаллизацию и в деформированном металле развивается полигонизация.

Отработана методика проведения металлографических исследований микроструктуры после деформирования и способы обработки и представления данных. Изучена технология подготовки микрошлифов для металлографических исследований и механических испытаний.

Описанный в данной главе комплекс исследований структурного состояния и механических свойств изучаемых материалов позволяет полностью выполнить поставленные в монографии задачи и обеспечить надежную достоверность полученных результатов.

## **4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЕ-ВОЛОЧЕНИЕ**

В данной главе представлены результаты исследования метода «прессования-волочение» на лабораторном и опытно-промышленном оборудовании.

### **4.1 Подготовка и проведение эксперимента**

Проведение натурального эксперимента является ключевым этапом в цикле научных исследований. Он позволяет на практике подтвердить или опровергнуть все возможные гипотезы и предположения. Наиважнейшей целью экспериментального исследования является выявление изменений в структуре материала заготовки, полученной в результате деформирования по предложенной схеме, а также в его механических характеристиках.

Для выявления характера влияния предложенной технологии на микроструктуру и свойства металла проведено экспериментальное исследование данной технологии в лабораторных условиях. Для проведения эксперимента по реализации и опробованию совмещенного процесса «прессование-волочения» был использован промышленный волочильный стан В - 1/550 М, установленный в лаборатории кафедры «Обработка металлов давлением» Карагандинского государственного индустриального университета.

Общий вид волочильного стана представлен на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Общий вид волочильного стана

Данный волочильный стан предназначен для холодного волочения без скольжения проволоки с катанки исходного диаметра 8-3,6 мм до диаметра 7-3 мм. Волочильный стан представляет собой однообразный блок с вертикально расположенным барабаном диаметром 550 мм. Привод к барабану осуществляется от электродвигателя переменного тока через коробку скоростей, одну цилиндрическую и одну коническую пару шестерен, смонтированных в одном корпусе. Электропривод монтируется на отдельной плите. К корпусу редуктора крепится поворотный кран.

На основе имеющихся возможностей в качестве заталкивающего устройства при проведении эксперимента использовали переделанный острильный станок (рисунок 4.2) волочильного стана, в частности осуществили перефазировку данного станка, чтобы валки вращались в нужном направлении и производили захват проволоки и за счет активных сил трения заталкивание ее в равноканальную ступенчатую матрицу. В остальном данный станок соответствует разработанной в работе установке.



Рисунок 4.2 – Острильный станок

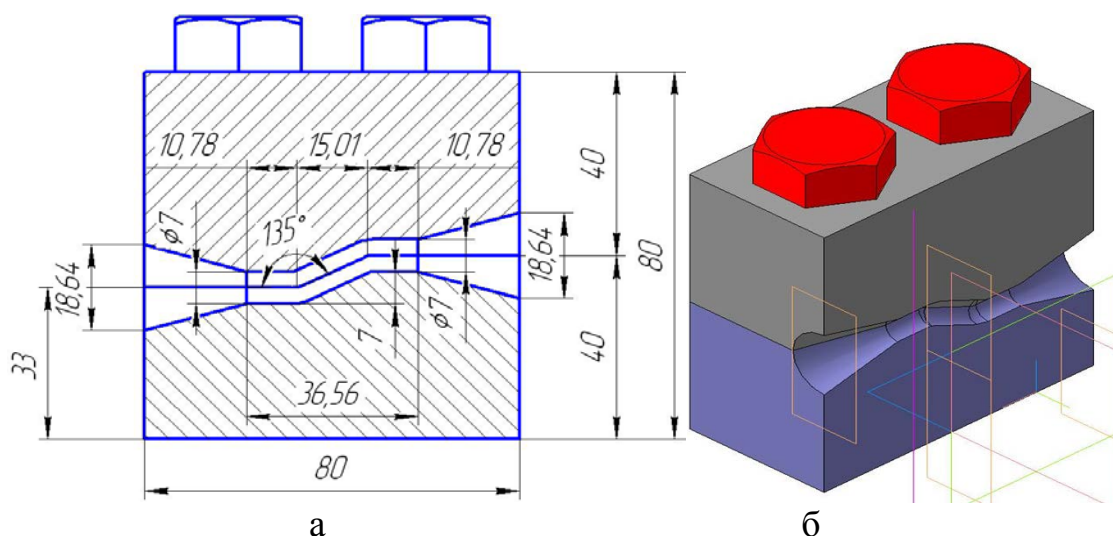
## **4.2 Разработка и изготовление образцов и оснастки для РКУП-В**

### **4.2.1 Разработка и изготовление равноканальной ступенчатой матрицы**

Для реализации совмещенного процесса «прессование-волочение» была использована дополнительная оснастка – равноканальная ступенчатая матрица. Исходя из этого, первоначально необходимо изготовить матрицу.

В соответствии с разработанным чертежом равноканальной ступенчатой матрицы (рисунок 4.3а) была построена соответствующая модель матрицы (рисунок 4.3б) и изготовлен комплект равноканальных ступенчатых матриц с различным диаметром каналов матрицы в механическом цехе АО «АрселорМиттал Темиртау» из штамповой стали марки 5ХВ2С (рисунок 4.4).

После изготовления для повышения твердости и прочности матрица была подвергнута термической обработке – закалке и последующему отпуску.



а – чертеж матрицы; б – модель матрицы в разрезе

Рисунок 4.3 – Равноканальная ступенчатая матрица

Геометрические размеры матрицы приняты, согласно результатам, полученным при моделировании в программном комплексе Deform и приведенных в работах [6, с. 11; 72, с.182; 78, с.98]. На основании результатов проведенного моделирования, угол наклона между каналами матрицы был принят равным  $2\theta=135^\circ$ . Данный угол за счет совмещения двух углов  $90^\circ+45^\circ$  обеспечивает доминирование сдвиговых (не разрушающих) напряжений над нормальными (разрушающими) напряжениями. Скругления на стыках каналов матрицы отсутствуют с целью интенсификации сдвиговых деформаций. Согласно выбранной технологии изготовления, матрица будет состоять из двух половин (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Изготовленная равноканальная ступенчатая матрица

#### 4.2.2 Изготовление образцов для проведения эксперимента

В качестве опытных образцов использованы мерные отрезки стальной проволоки марки Ст.3, алюминиевой проволоки холодной высадки марки А0 и медной проволоки марки М1, диаметром  $D=7,0$  мм (с целью исключения застревания проволоки в каналах матрицы было принято условие минусового допуска на диаметр проволоки), длиной  $L=3000$  мм (рисунок 4.5).

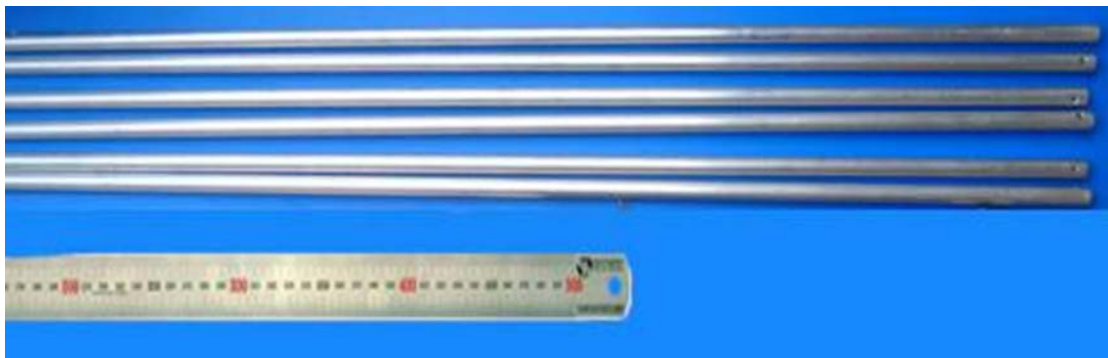


Рисунок 4.5 – Исходная заготовка

Состояние поставляемой проволоки – нагартованная, без термообработки. Состояние поверхности проволоки – гладкая, без видимых дефектов, требуемая подготовка поверхности заключается в незначительной строжке (шлифовании).

Подготовка образцов состоит в следующем:

- 1) отрезание кратных отрезков проволоки;
- 2) выпрямление отрезанных образцов;
- 3) подготовка поверхности образцов;
- 4) отжиг проволоки;
- 5) отбор контрольных проб для проведения механических испытаний и микроструктурного исследования.

#### 4.3 Методика проведения эксперимента

Лабораторный эксперимент был проведен на промышленном волочильном стане В – I/550 М. Для этого перед волокой (рисунок 4.6) была закреплена равноканальная ступенчатая матрица с диаметром каналов равном 7 мм [112]. Матрица была расположена в контейнере для смазки. В качестве смазки использовали стружку мыла.

Основным условием непрерывности процесса прессование-волочение является согласование скоростей вытяжки проволоки в волоке и скорости проталкивания проволоки в равноканальной-ступенчатой матрице. Стан оборудован системой автоматического регулирования линейных скоростей вращения барабана и роликов затапливающего устройства. Управление приводом блоков осуществляется автоматически путем изменения частоты тока двигателя. Таким образом, при установке любого маршрута, стан



автоматически подстраивается и скорости устанавливаются таким образом, чтобы произошла их синхронизация. Уменьшение нагрева проволоки в процессе волочения достигается за счет снижения частных обжатий. Скорость вытягивания и скорость проталкивания проволоки согласуется с таким условием, что бы обеспечивался режим волочения с противонатяжением.



Рисунок 4.6 – Расположение матрицы в оснастке стана

РКУП-В проволоки производили следующим образом: предварительно заостренный конец проволоки подавали в заталкивающее устройство и за счет сил контактного трения, создаваемыми при соприкосновении проволоки с валками, проволока захватывалась в зев валков, а на выходе из него проталкивалась через каналы равноканальной ступенчатой матрицы и волоку, установленную в волокодержателе и осуществили ее захват заправочными клещами, крюк которых введен в один из пазов на барабане (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 – Установка для проведения процесса «прессование-волочение»

После набора на барабане 2 витков проволоки, стан был остановлен. Начальный диаметр проволоки составлял 7,0 мм. После первого цикла прессование-волочение диаметр проволоки составил 6,5 мм. После четвертого прохода с применением процесса «прессование-волочение» диаметр проволоки составил 5,0 мм. Эксперимент был продублирован четыре раза.

Так как при прохождении проволокой матрицы скорость течения металла по сечению заготовки не одинакова – нижние слои опережают верхние. Это приводит к искажению первоначальной формы заготовки – заострению на торцах. При многоцикловом прессовании этот эффект нежелателен, т.к. возникает необходимость дополнительной правки заготовки между проходами. Чтобы свести этот негативный эффект к минимуму рационально применение так называемого маршрута В, при котором заготовка после каждого цикла кантуется (поворачивается) вокруг продольной оси на 90°. Кроме того такая кантовка обеспечивает знакопеременную деформацию и помогает измельчать зерно в процессе прессования (рисунок 4.8).

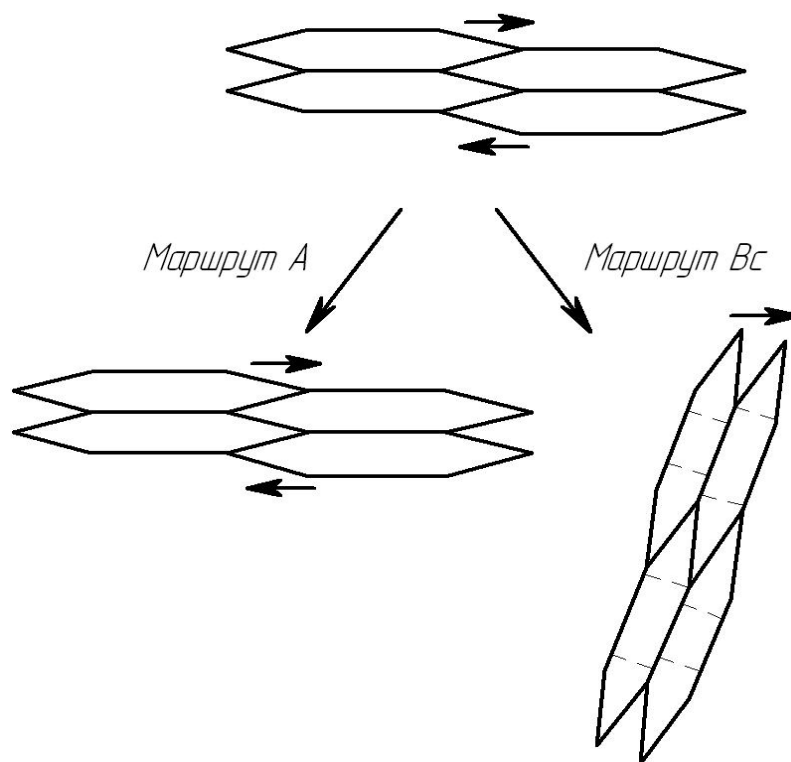


Рисунок 4.8 – Влияние маршрута прессования на измельчения зерна

Для выявления преимущества предлагаемой технологии по сравнению с действующей технологией волочения. Провели четыре опыта по волочению проволоки по действующей технологии. Т.е. осуществляли чистое волочение катанки диаметром 7,0 мм в волоке на диаметр 6,5 мм, после второго 6,0 мм, после третьего 5,5 мм и после четвертого 5,0 мм.

В обоих случаях эксперимент проводили при комнатной температуре и в качестве смазки использовали стружку мыла.

## **Выводы**

С целью осуществления совмещенного процесса «прессование-волочение» была разработана конструкция равноканальной ступенчатой матрицы и изготовлен комплект матриц с различным диаметром каналов.

На основе существующего промышленного волочильного стана В - 1/550 М и переделанного под задающее устройство острильного станка была собрана экспериментальная установка совмещенного процесса «прессование-волочение».

Далее был проведен лабораторный эксперимент, который, по сути, являлся верификацией прочностного расчета. В ходе сравнения значений было отмечено, что результаты измерения экспериментальных значений имеют очень хорошую сходимость с результатами компьютерного моделирования, что говорит об адекватности построенной компьютерной модели. Эксперимент проводился на стальной, алюминиевой и медной проволоке.



## **5 ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ УМЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ В ПРОВОЛОКЕ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ «ПРЕССОВАНИЕ-ВОЛОЧЕНИЕ»**

Свойства металлов определяются их внутренней структурой. Некоторые свойства непосредственно связаны с атомной или кристаллической структурой. Другие зависят от микроструктуры, и именно они рассматриваются в данном разделе. Разные свойства по-разному реагируют на изменения микроструктуры. Одни свойства, по существу, являются структурно нечувствительными, другие сильно зависят от структуры. Механические свойства металлических материалов являются структурно-чувствительными, поэтому для их повышения используют методы деформационно-термической обработки, позволяющие получать различные типы структур.

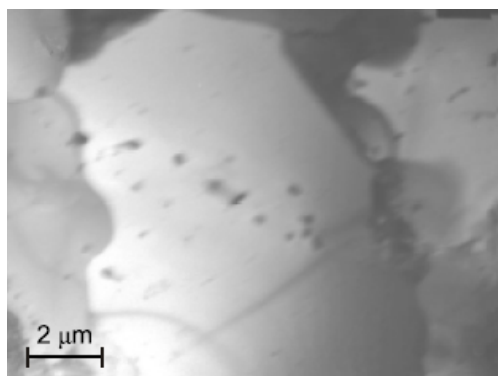
Металлографические и механические исследования изучаемых материалов позволят полностью выполнить поставленные в монографии задачи и обеспечить надежную достоверность полученных результатов.

### **5.1 Сравнение структуры стальной проволоки и заготовок после обработки различными методами пластической деформации**

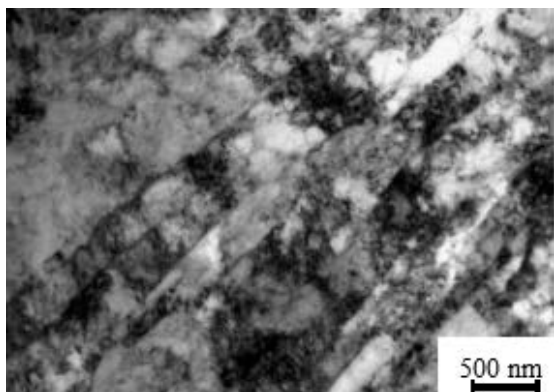
Для выявления преимуществ предлагаемой технологии по сравнению с действующими технологиями волочения была проведена деформация проволоки из стали Ст3 по четыре прохода по каждой технологии. Для сравнения уровня механических свойств углеродистой стальной проволоки с комплексом свойств, сформированным в результате разработанного метода комбинированной деформационной обработки, выбрали метод равноканальной угловой свободной протяжки (РКУ-протяжка). Это связано с тем, что РКУ свободная протяжка является непрерывным методом деформационного наноструктурирования углеродистой стальной проволоки, данный метод легко встраивается в технологию производства проволоки без существенного ее изменения [79, с. 10]. Скорости обработки проволоки как при разработанном методе, так и при РКУ протяжке приблизительно одинаковы. Кроме того, накоплен богатый экспериментальный материал по уровню механических свойств углеродистой стальной проволоки после РКУ протяжки. Т.е. осуществляли чистое волочение катанки диаметром 7,0 мм в волоке на диаметр 6,5 мм, РКУ-протяжку и совмещенный процесс «прессование-волочение» (РКУП-В). После каждого опыта производили измерение диаметра проволоки и вырезку темплетов.

Результаты исследования микроструктуры Ст3, до и после деформирования по предложенным технологиям представлены на рисунке 5.1 [114].

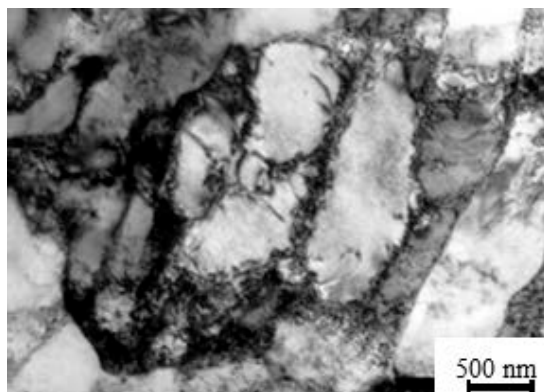
В исходном состоянии исследуемая сталь имеет феррито-перлитную структуру с содержанием перлита около 16 %, со средним размером зерен 12 мкм.



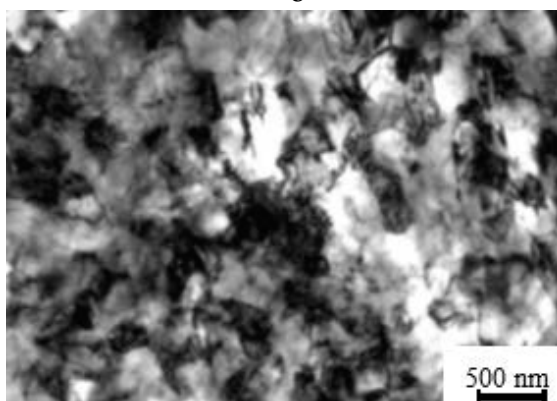
а



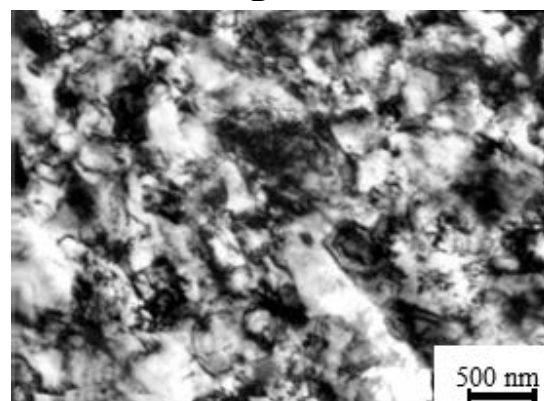
б



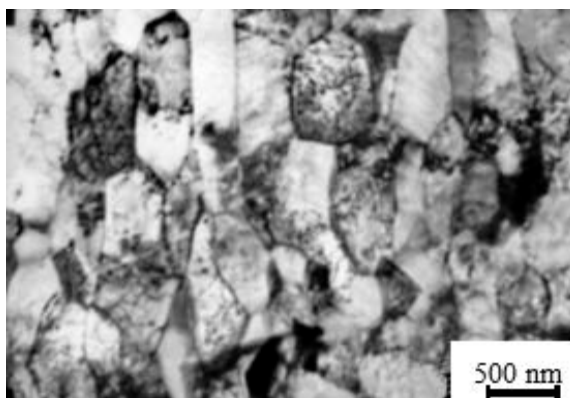
в



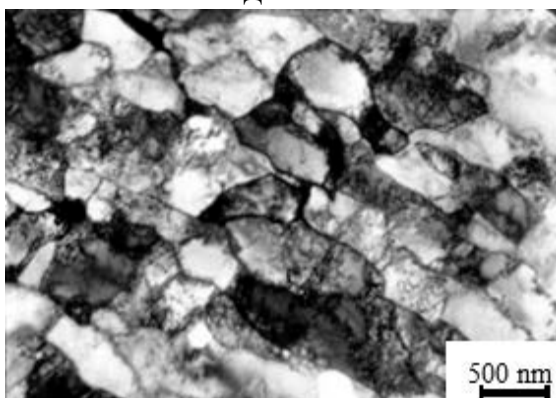
г



д



е



ж

а – исходная структура; б, в – после действующей технологии волочения  
 г, д – после технологии РКУ-протяжка; е, ж – после предлагаемой технологии  
 РКУП-В; б, г, е – продольное направление; в, д, ж – поперечное направление

Рисунок 5.1 – Структура проволоки из стали марки Ст. 3

Проведя анализ микроструктуры деформированных образцов можно сделать вывод о том, что холодная деформация при волочении по действующей технологии с умеренным и высоким суммарным обжатием (от 50 до 85% - в зависимости от размеров сечения) приводит к образованию ярко выраженной текстурованной структуры. Однако даже в результате значительных обжатий, полученных проволокой в процессе волочения, не все зерна измельчаются и оказываются развернутыми в направлении оси деформации. Как показывает анализ микроструктуры, в результате неравномерного распределения деформации по поперечному сечению образца в центральной части сохраняется зона крупных зерен, следствием чего является ненадлежащий уровень пластических свойств готовой проволоки, в частности относительного удлинения. Так из рисунка 5.1в видно, что в данном случае деформирование приводит к незначительному измельчению зерна в поперечном направлении (рисунок 5.1в), в продольном направлении (рисунок 5.1б) зерна удлиняются и несколько утончаются с образованием видимой аксиальной текстуры [115]. Также можно отметить, что в продольном направлении деформированных образцов структура ярко выражена и имеет полосчатый характер. Появление текстуры волочения приводит к анизотропии свойств материала в продольном и поперечном направлениях, что может негативно сказаться на параметрах эксплуатации готового изделия.

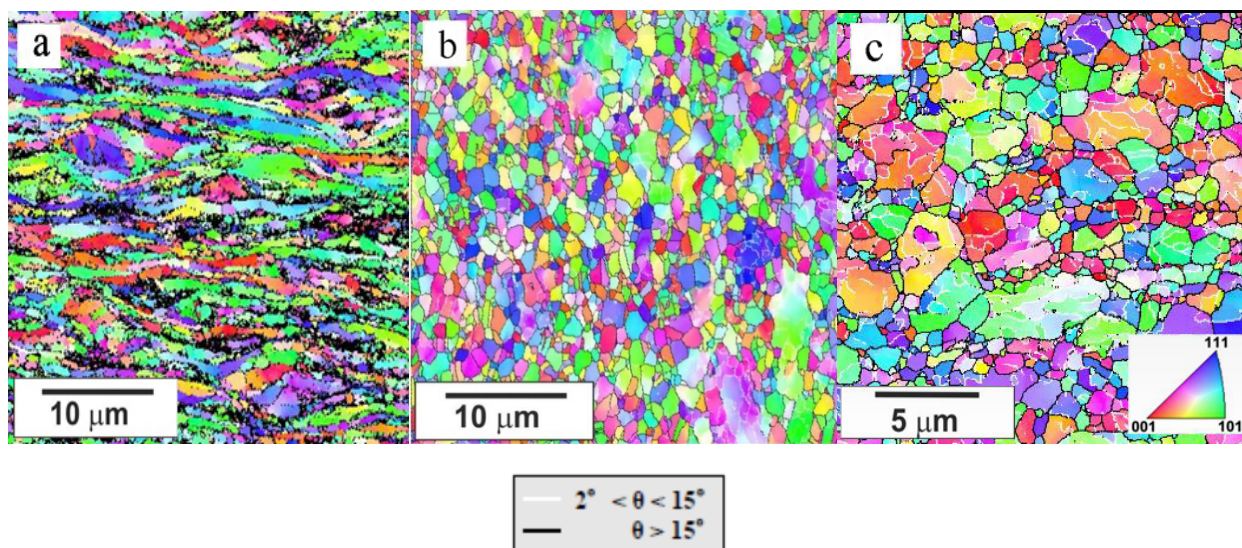
Чтобы уменьшить проявления аксиальной текстуры деформации необходимо проводить рекристаллизационный отжиг полученной проволоки при правильно выбранных параметрах термообработки [99, 116].

В результате анализа микроструктуры стали после РКУ-протяжки можно сделать вывод о равномерной проработке структуры, как в продольном, так и в поперечном сечении (рисунок 5.1г, д), но структура получилась разнотелой, средний размер зерен/субзерен составляет 1-2 мкм. Недостатком такого метода является оваллизация проволоки.

При использовании предлагаемой технологии деформирования, т.е. совмещенного процесса «прессование-волочение», как видно из рисунка 5.1е, ж, за четыре прохода произошло существенное изменение исходной микроструктуры, при этом значительно в меньшей степени выражена текстура, а соответственно и анизотропия. Предлагаемая совмещенная технология «прессование-волочение» устраняет недостатки процесса волочения. На первой стадии волочения до обжатия 30-40% формируется ячеистая структура. В результате разворота и дробления неблагоприятно ориентированных цементитных пластин повышается плотность дислокаций на поверхностях раздела фаз, увеличиваются искажения второго рода. Локальное увеличение поля внутренних напряжений (локальный наклеп ферритной матрицы) вызывает образование устойчивых микротрещин. Интенсивное раскрытие стабильных микродефектов приводит к релаксации напряжений, что в процессе последующей деформации открывает ранее заблокированные источники Франка-Рида. Одновременно совершенствуется ячеистая структура, возникает волокнистое строение и формируется текстура. Размер зерен/субзерен после 4

проходов составляет  $\sim 0,6$  мкм. Добиться ультрамелкозернистой структуры только за счет однородного потока дислокаций нельзя: по мере накопления пластической деформации и роста плотности дислокаций происходит непропорционально быстрое увеличение стопоров и препятствий, тормозящих их продвижение по кристаллу. Дислокационный поток постепенно истощается, уровень внутренних напряжений повышается. Так продолжается до тех пор, пока не начинают возникать трещины, происходит хрупкое разрушение образца. Чтобы этого не произошло, и подводимая к образцу энергия не накапливалась в материале преимущественно в виде упругих искажений, а продолжала диссипировать, до волочения применили деформацию в равноканальной ступенчатой матрице, обеспечивающую сдвиговые деформации и образование большеугловых границ, в результате этого создаются условия для продолжения пластической деформации при больших ее значениях [117].

EBSD анализ, проведенный по методике описанной в разделе 3, подтвердил данные полученные на ПЭМ.

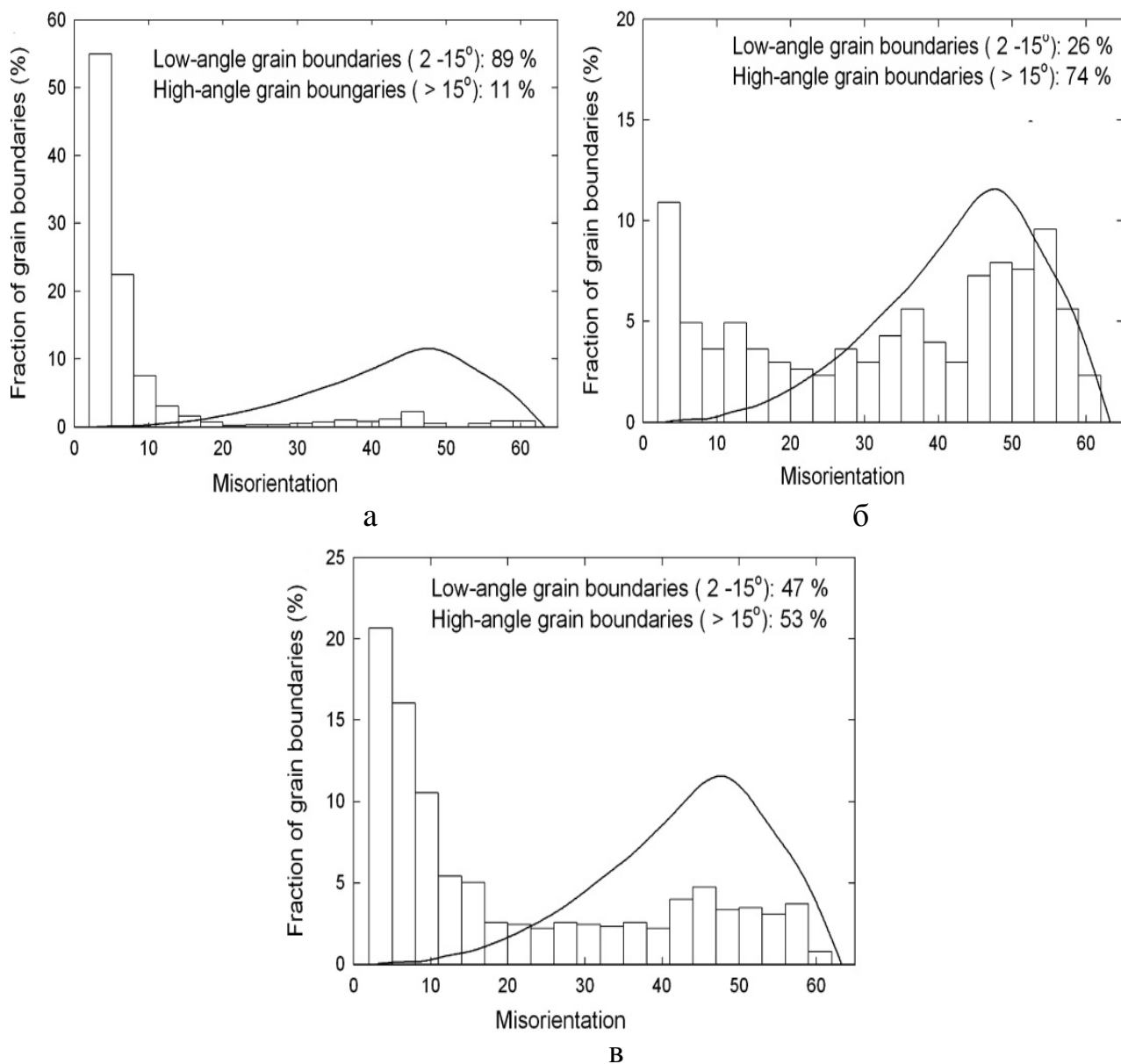


а – волочение; б – РКУП-В; в – РКУ-протяжка

Рисунок 5.2 – Ориентационные карты микроструктуры

Как показывает рисунок 5.2а при традиционном волочении образуются только малоугловые границы. При применении РКУ-протяжки доля высокоугловых границ увеличивается, как показано на рисунке 5.2в. Совмещенная технология «прессование-волочение» позволяет получить мелкозернистую ( $\sim 1$  мкм) зеренную структуру с высокой долей большеугловых границ (рисунок 5.2б). При РКУ-протяжке размер зерен значительно больше, а доля малоугловых границ выше.

На рисунке 5.3 показаны гистограммы разориентировки углов после всех трех изученных технологий. Сплошная линия представляет собой хаотическое распределение углов разориентировки.



а – волочение; б – РКУП-В; в – РКУ-протяжка

Рисунок 5.3 – Гистограммы углов разориентировки

EBSD-анализ подтвердил данные полученные на ПЭМ. При совмещенной технологии «прессования-волочение» была сформирована мелкозернистая (~ 1 мкм) зеренная структура с большой долей большеугловых границ. При РКУ-протяжке размер зерна намного больше, а доля малоугловых границ выше. При традиционном волочении (рисунок 5.3а) образуются только малоугловые границы, и эти границы составляют ~89% всех границ присутствующих в микроструктуре. При применении технологии РКУ-протяжки доля большеугловых границ увеличивается и достигает 53%, как показано на рисунке 5.3в. Наибольшее количество высокоугловых границ получается с



использованием предлагаемой технологии «прессования-волочения» (рисунок 5.3б) их доля составляет 74%.

Помимо исследования изменения размера зерна при деформировании, были изучены механические свойства стальной проволоки после каждого цикла деформации, по действующим и предлагаемой технологиям деформирования. Результаты механических исследований представлены в таблице 5.1 [118]. Прочностные характеристики стали представлены значениями предела текучести  $\sigma_T$ , временного сопротивления разрушению (предел прочности)  $\sigma_B$  и твердостью по Бринеллю; пластические характеристики представлены значениями относительного сужения и удлинения образцов до разрушения.

Таблица 5.1 – Результаты механических испытаний образцов проволоки

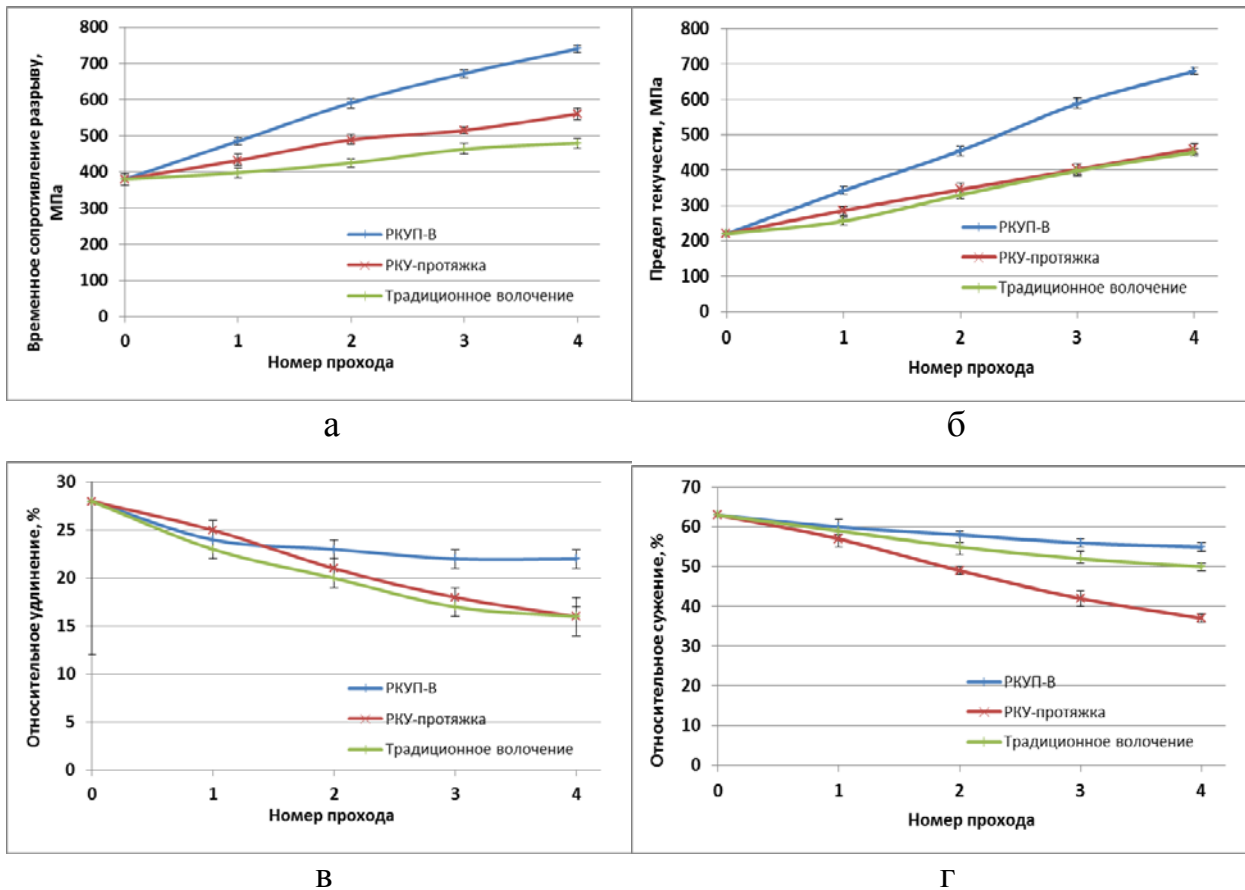
Наименование технологии обработки	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi_5$ , %	НВ
Исходное состояние	380	220	28,0	63,0	126
Классическое волочение	480	450	16,5	37,0	176
Технология РКУ-протяжка	560	450	16,0	50,0	190
Технология РКУП-В	740	680	22,0	55,0	260

По результатам механических испытаний на растяжение были построены графики зависимости механических характеристик от цикла деформирования по разным технологиям, представленные на рисунке 5.4.

Наибольшее изменение значений предела текучести и временного сопротивления разрушению (как и изменение твердости по Бринеллю) при «прессовании-волочении» фиксируется после первого прохода. При последующих проходах их увеличение происходит более равномерно. Значения временного сопротивления разрушению и предела текучести увеличиваются за четыре прохода с 380 до 740 МПа (абсолютный прирост составляет 360 МПа) и с 220 до 680 МПа (абсолютный прирост составляет 460 МПа), соответственно.

Анализ экспериментальных данных показал, что проволока после совмещенной технологии РКУП-В имеет более высокий запас пластичности: отношение условного предела текучести к временному сопротивлению разрыву меньше, чем при волочении по аналогичному маршруту. Это свидетельствует о том, что данная проволока может быть подвергнута большим степеням деформации на последующих технологических операциях ее передела без проведения промежуточных отжигов.

Как известно, характеристикой, наиболее полно отражающей способность материала к пластическому деформированию, является относительное сужение в области шейки. Относительное сужение в стали марки Ст3 после деформации методом РКУП-В меняется с 63 до 55%, т.е. падение не такое существенное, как при классическом волочении.



а – временное сопротивление разрыву; б – предел текучести; в – относительное удлинение; г – относительное сужение

Рисунок 5.4 – Графики зависимости механических характеристик стали марки Ст.3 от цикла деформирования

С целью установления способности проволоки из стали Ст.3 после деформирования по описанным технологиям выдерживать многократные деформации были проведены испытания проволоки на перегиб, по методике, представленной в разделе 3.

Образцы стальной проволоки прошедшие механические испытания на перегиб показаны на рисунке 5.5.

Результаты механических испытаний образцов проволоки из стали марки Ст.3 на перегиб по проходам, представлены в таблице 5.2.

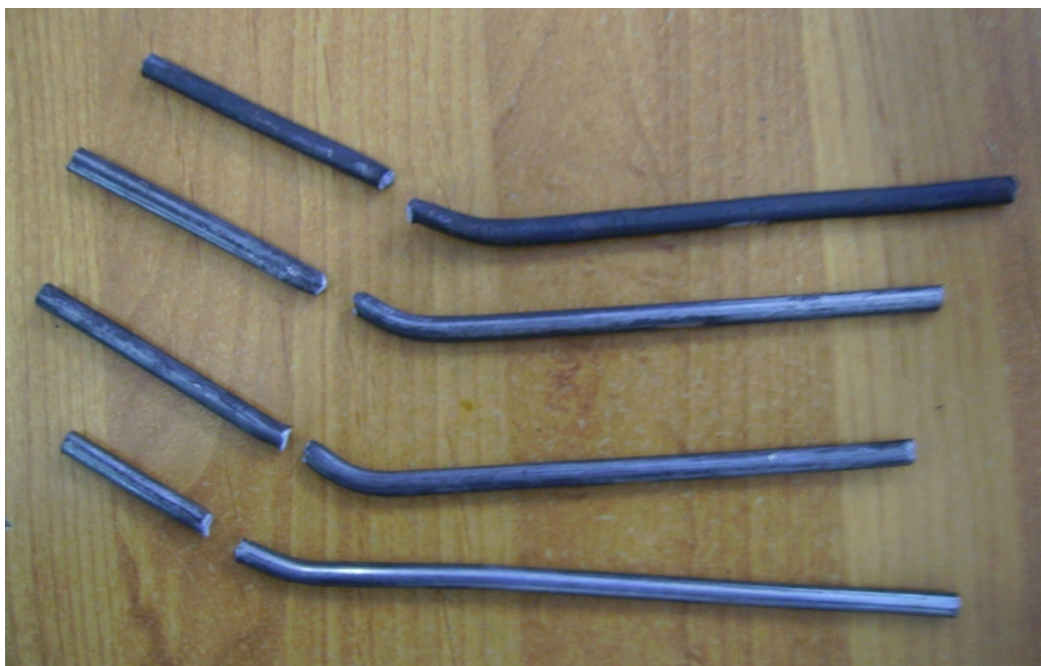


Рисунок 5.5 – Образцы проволоки после испытания на перегиб

Таблица 5.2 – Результаты механических испытаний образцов на перегиб по проходам

Наименование технологии обработки	Количество перегибов				
	исходная заготовка	1 проход	2 проход	3 проход	4 проход
Классическое волочение	14	12	10	9	7
		11	10	8	6
		11	11	8	7
Технология РКУ-протяжка		12	12	10	10
		12	11	11	10
		11	11	11	11
Технология РКУП-В		12	11	11	10
		11	12	11	11
		11	11	12	11

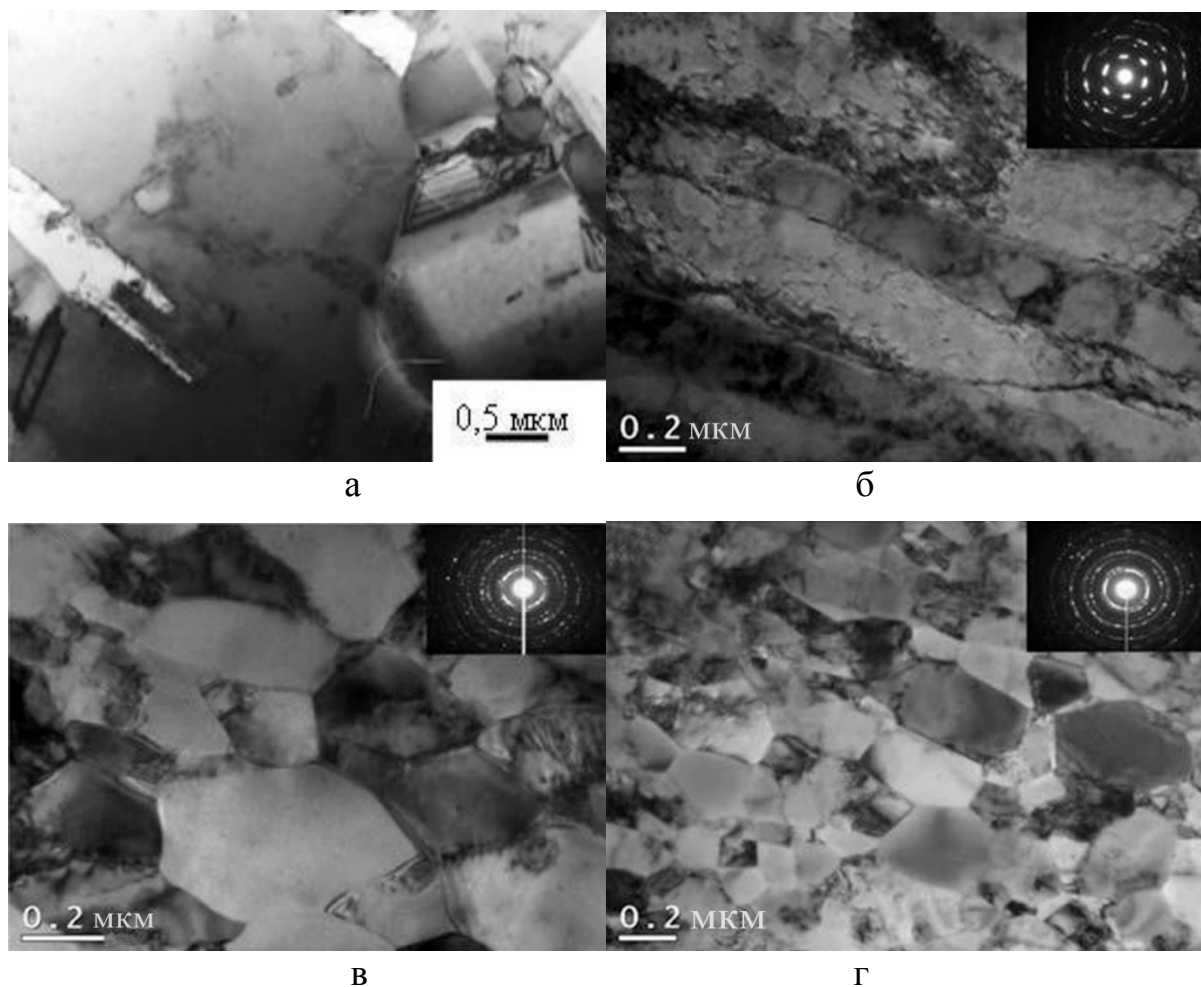
Из анализа проведенных механических испытаний образцов, деформированных по различным технологиям, можно сделать вывод, что лучшими механическими характеристиками обладает проволока, подвергнутая обработке по совмещенной технологии «прессование-волочение». Наблюдается увеличение значений предела текучести и предела прочности, а также показателя твердости, с сохранением пластичности.



## 5.2 Структура и свойства медной проволоки и заготовок после обработки различными методами пластической деформации

Также как и для стальной проволоки, для выявления преимущества предлагаемой технологии при производстве медной проволоки по сравнению с действующими технологиями волочения и РКУП [119-122] была проведена деформация по каждой технологии с одинаковым числом проходов 4. В процессе деформирования осуществляли чистое волочение катанки диаметром 7,0 мм в волоку на диаметр 6,5 мм при первом проходе, РКУП и совмещенный процесс РКУП-В (после 4 проходов диаметр проволоки составлял 5 мм).

На рисунке 5.6 приведены ПЭМ изображения структуры медных образцов.



а – исходное состояние; б - волочение; в – РКУП; г – РКУП-В

Рисунок 5.6 – Микроструктура меди

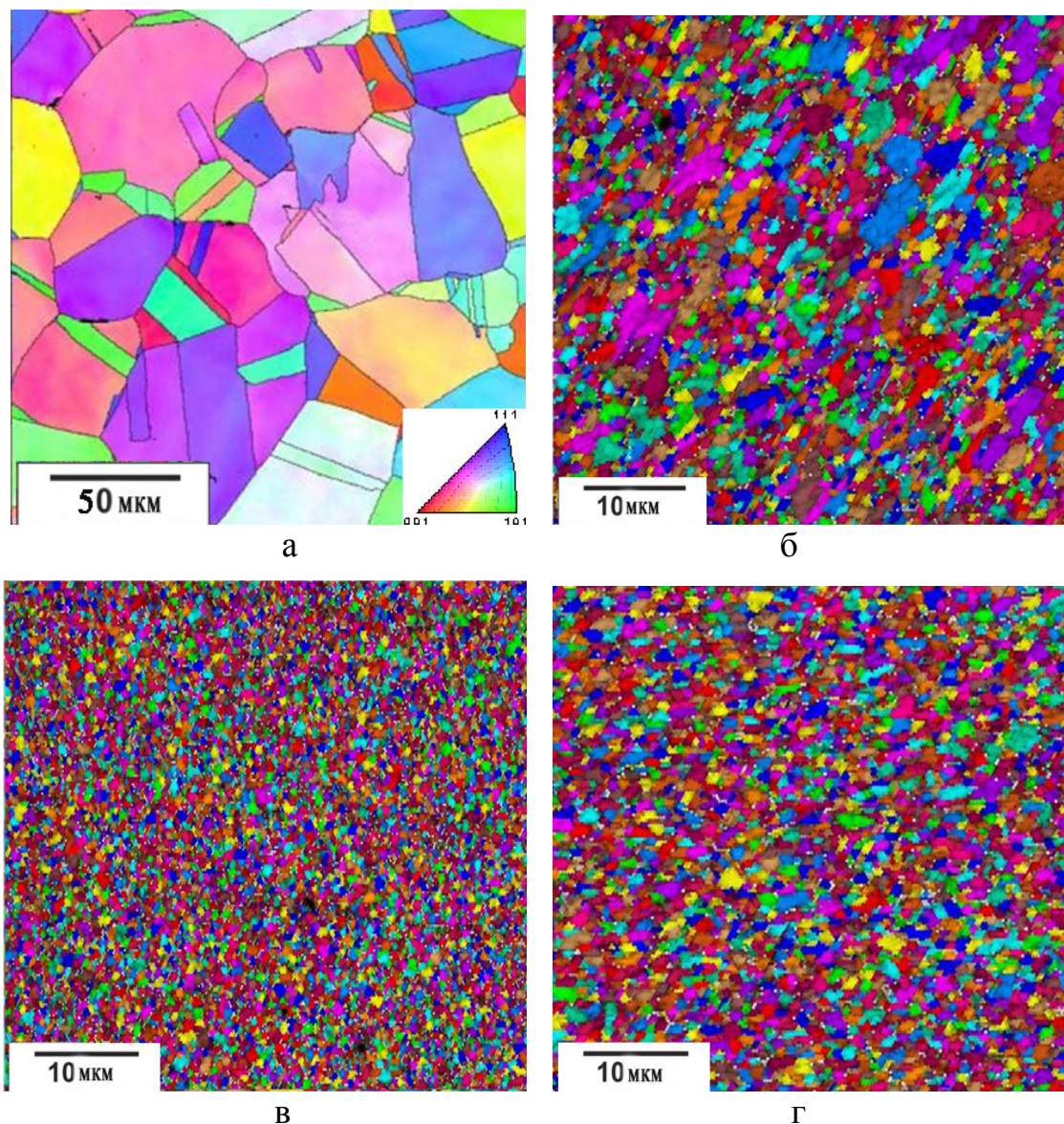
На рисунке 5.6а показана микроструктура меди в исходном состоянии, после отжига при температуре 700°С с охлаждением в воде. Структура состоит из полиэдрических зерен, в которых присутствуют двойники (рисунок 5.6а). Для оценки эффективности проведенных пластических деформаций, необходимо сравнить микроструктуру сплава до и после деформирования.

Фотографии микроструктуры после четырех циклов деформирования представлены на рисунке 5.6б-г. Микроструктурные исследования медной проволоки показали, что в исходном состоянии медь имеет крупнозернистую структуру с большим количеством двойников и средним размером зерна 50 мкм (рисунок 5.6а). После традиционного волочения субструктура меди после 4 проходов значительно измельчается, по сравнению с исходной, средний размер зерен равен 4 мкм (рисунок 5.6б), но только в поперечном сечении. В продольном же сечении происходит удлинение зерен в микроструктуре материала вдоль направления деформации, что является типичной картиной, характерной для процесса волочения. Но даже в результате значительных обжатов, полученных проволокой в процессе волочения, не все зерна измельчились и оказались развернутыми в направлении оси деформации из-за неравномерности распределения деформации. Добиться ультрамелкозернистой структуры при традиционном волочении только за счет увеличения суммарной степени деформации нельзя, так как данный технологический процесс характеризуется разноименной схемой главных деформаций, при этом возникающие в процессе деформирования растягивающие напряжения способствуют охрупчиванию металла при волочении, а максимально допустимое значение  $\sigma_1 \leq \sigma_T$  ограничивает степень деформации за проход [123]. При применении же равноканальной ступенчатой матрицы в деформируемом материале создаются всесторонние сжимающие напряжения на всех этапах деформирования, что снижает растягивающие напряжения и позволяет увеличивать степень деформации за один проход, а вместе с тем и прочностные характеристики.

РКУП за 4 прохода не приводит к образованию однородной по типу структуры, в ней присутствуют дислокационные ячейки, субзерна и зерна, средний размер элементов структуры составляет 0,4-0,6 мкм (рисунок 5.6в), что согласуется с данными работ [124-126]. 4 прохода при РКУП недостаточно, чтобы получить равноосную однородную ультрамелкозернистую структуру.

Первый проход деформирования, по предлагаемой технологии «прессование-волочение», приводит к уменьшению межграницных расстояний в продольном и поперечном сечениях (доля большеугловых границ ~ 11%). Формирование новых границ при волочении не происходит, все фрагментирование структуры совершается в равноканальной ступенчатой матрице за счет сдвиговых деформаций. После второго прохода деформирования образуется структура смешанного типа, при этом большинство границ толстые и размытые, с увеличением же степени деформации сформировались тонкие четкие границы (доля большеугловых границ ~ 24%). После третьего прохода в структуре наблюдается значительное повышение доли большеугловых границ (~ 45%), размер зерен составляет около 1,0 мкм [127]. В результате, после четырех проходов формируется достаточно равноосная структура со средним размером зерен 0,4 мкм (рисунок 5.6г) с наличием большеугловых границ ~ 68%.

На рисунке 5.7 показан EBSD анализ микроструктуры чистой меди в исходном состоянии, без обработки и после обработки различными методами (треугольник цветового кода указан в правом нижнем углу).



а – исходное состояние; б – волочение; в – РКУП; г – РКУП-В

Рисунок 5.7 – Ориентационные карты микроструктуры

Для исходной меди характерно хаотичное распределение ориентировок зерен, средний размер зерна составляет 50 мкм, доля двойников  $\sim 37\%$ , как показано на рисунке 5.7а. На рисунке 5.7б преобладают области, тяготеющие к ориентировке (111), это объясняется тем, что в ГЦК-металлах основной плоскостью скольжения является (111), поэтому наблюдаемое увеличение площади синих участков с такой ориентировкой на ориентационных картах носит деформационный характер [128]. Для ориентационных карт (рисунок 5.7в-г) характерно хаотичное распределение ориентировок зерен. Применение

операции волочения после РКУП приводит к увеличению доли большеугловых границ от ~65% до ~68% при уменьшении среднего размера зерна от 0,5 до 0,4 мкм (рисунок 5.7 в, г).

После деформирования методом РКУП-В наблюдается более высокая доля большеугловых границ по сравнению с РКУП (рисунок 5.7в). Повышение доли большеугловых границ не может быть объяснено действием геометрического эффекта деформации. Возможно, это связано с активно проходящими при волочении процессами динамической рекристаллизации, обеспеченной достижением критического значения плотности дислокаций и размера зерен. Так как медь имеет низкую температуру рекристаллизации за счет низкой энергии дефектов упаковки, которая облегчает развитие двойникования. Именно действие возврата и рекристаллизации во многом обеспечивает формирование большеугловых границ.

После деформирования проволоки по разным технологиям были выполнены измерения микротвердости (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Результаты определения микротвердости меди марки М1

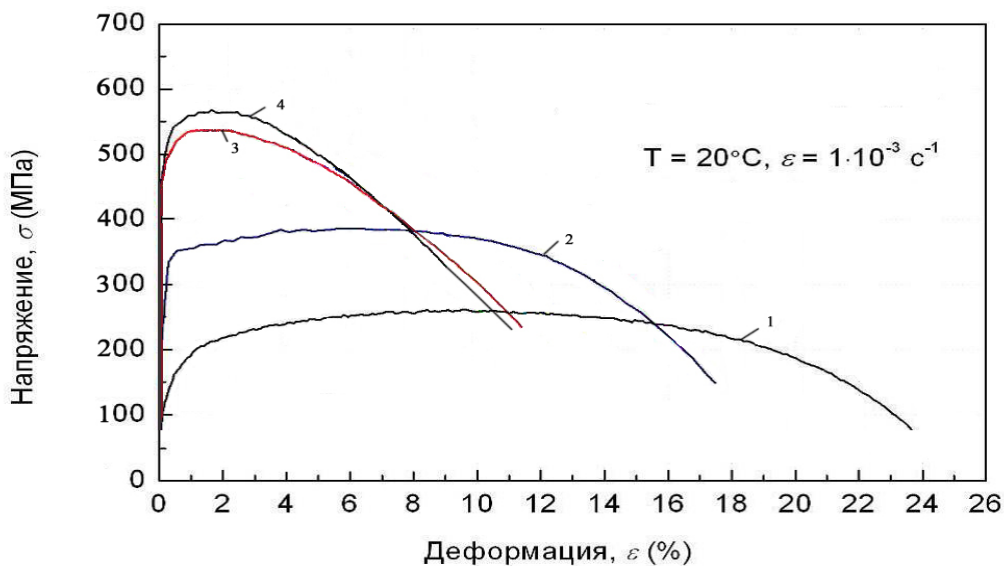
Наименование технологии обработки	Микротвердость, МПа
Исходное состояние	595
Классическое волочение	680
РКУП	890
Технология РКУП-В	870

Значения микротвердости меди с ультрамелкозернистой структурой после 4 проходов в 1,5 раза превышают микротвердость исходной крупнозернистой меди и после традиционного волочения. Максимальные значения микротвердости для меди марки М1 составили 890 МПа и получены они после РКУП.

Анализ полученных данных показывает, что после всех видов деформации наблюдается равномерное распределение микротвердости образцов по всему сечению, что можно объяснить также происходящей в процессе деформации динамической рекристаллизацией.

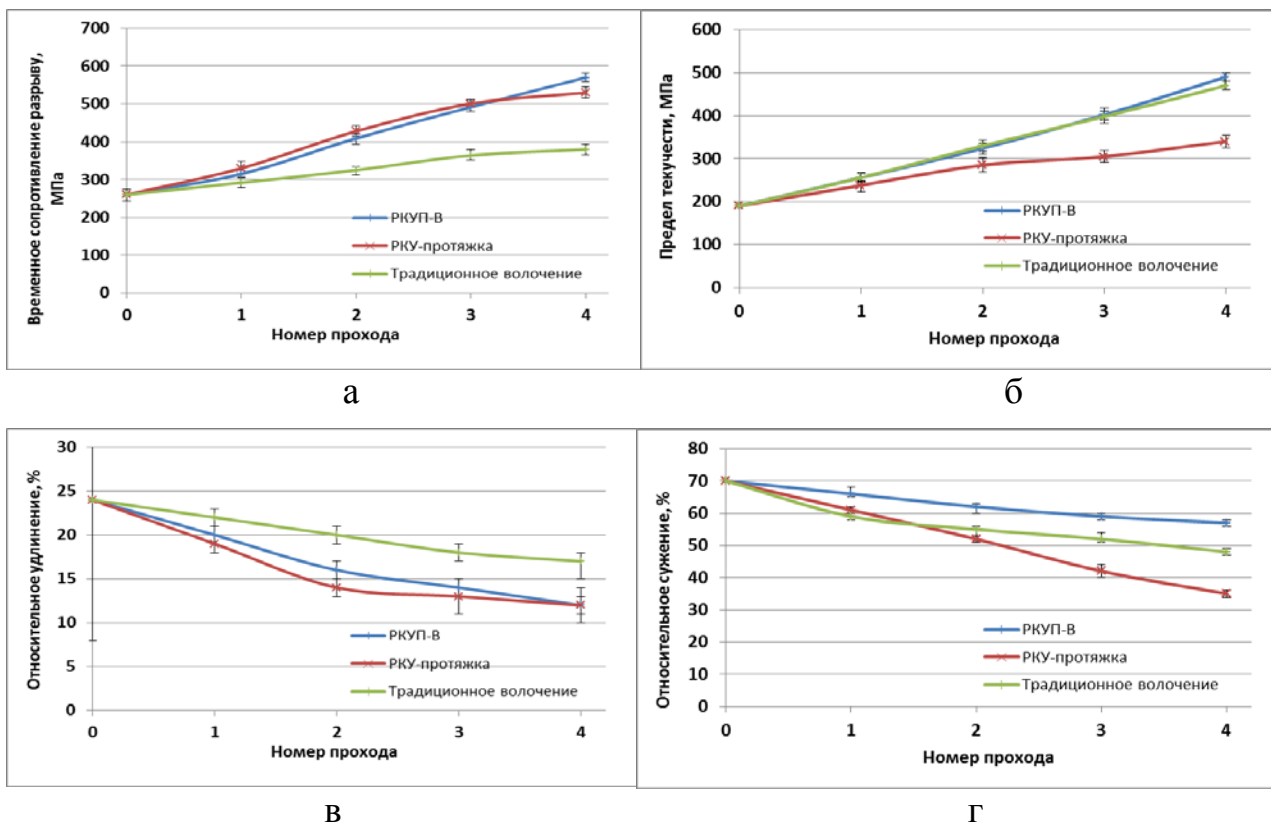
Помимо исследования изменений структуры при деформировании, после каждого вида деформации и определения микротвердости были исследованы механические свойства проволоки при растяжении при комнатной температуре (рисунок 5.8) и по результатам построены графики зависимости механических характеристик от цикла деформирования по разным технологиям, представленные на рисунке 5.9.





1 – исходное состояние; 2 – волочение; 3 – РКУП; 4 – РКУП-В

Рисунок 5.8 – Диаграммы растяжения образцов проволоки из меди



а – временное сопротивление разрыву; б – предел текучести; в – относительное удлинение; г – относительное сужение

Рисунок 5.9 – Графики зависимости механических характеристик меди марки М1 от цикла деформирования

По результатам испытаний на растяжение видно, что уровень прочности проволоки, подвергнутой прессованию-волочению, значительно превосходит аналогичный для образцов, подвергнутых традиционному волочению, разница составляет почти 45 %. Значения временного сопротивления разрыву и условного предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) увеличиваются за четыре прохода для традиционного волочения с 260 до 380 МПа (абсолютный прирост составляет 120 МПа) и с 190 до 340 МПа (абсолютный прирост составляет 150 МПа), соответственно. Для технологии РКУП абсолютный прирост временного сопротивления разрыву составляет 270 МПа, а для условного предела текучести – 280 МПа. С применением новой технологии прессование-волочение временное сопротивление разрыву и предел текучести увеличиваются за четыре прохода с 260 до 570 МПа (абсолютный прирост составляет 310 МПа) и с 190 до 490 МПа (абсолютный прирост составляет 300 МПа) соответственно [128, с.975]. Анализ полученных данных показывает, что наиболее высокими прочностными характеристиками обладает проволока, полученная по новой совмещенной технологии РКУП-В.

Относительное удлинение составляет около 12% как для РКУП, так и для совмещенного процесса РКУП-В. При традиционном волочении относительное удлинение несколько выше и составляет 17%, но это видимо, связано с активно проходящими при волочении процессами динамической рекристаллизации, обеспеченной достижением критического значения плотности дислокаций и размера зерен.

Результаты механических испытаний образцов проволоки из меди марки М1 на перегиб по проходам, представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 - Результаты механических испытаний образцов на перегиб по проходам

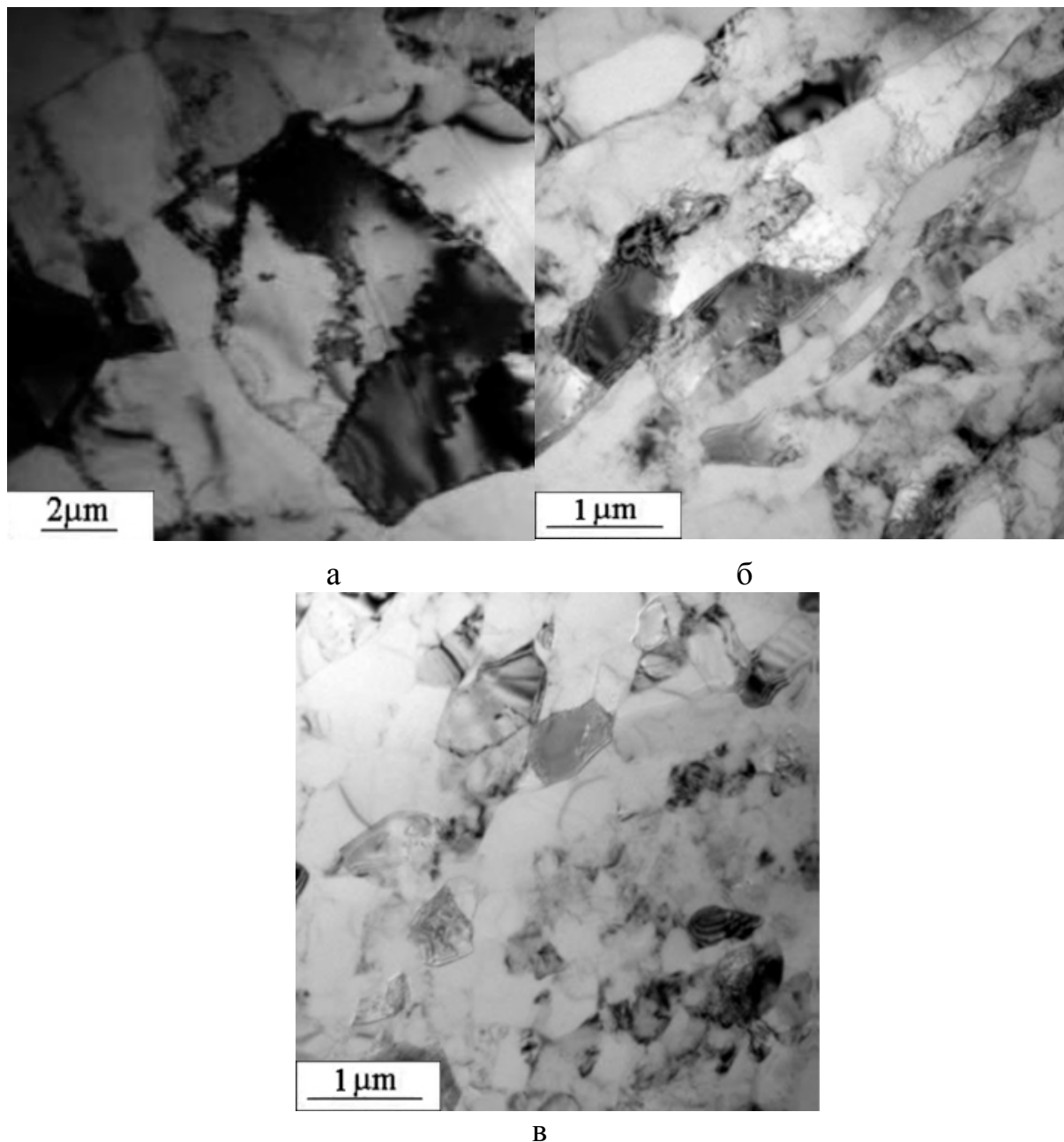
Наименование технологии обработки	Количество проходов	
	Исходная заготовка	4 проход
Классическое волочение	14	13
Технология РКУП		12
Технология РКУП-В		12

Анализ результатов механических испытаний при растяжении показывает, что наиболее высокими прочностными свойствами, по сравнению с другими методами обработки, обладает проволока, обработанная совмещенным процессом «прессование-волочение».

### 5.3 Структура и свойства алюминиевой проволоки и заготовок после обработки различными методами пластической деформации

Результаты исследования микроструктуры алюминия, до и после четвертого цикла деформирования представлены на рисунке 5.10 [129].

Исходная структура алюминия представляет собой поликристаллы со средним размером зерна 15-17 мкм.



а – исходная структура, б – волочение, в – РКУП-В

Рисунок 5.10 – Структура алюминиевой проволоки

После 4 циклов традиционного волочения получена разнотернистая структура, как правило, вытянутая в направлении волочения, ее размеры составляют около 0,5-0,8 мкм в ширину и порядка 2-5 мкм в длину.

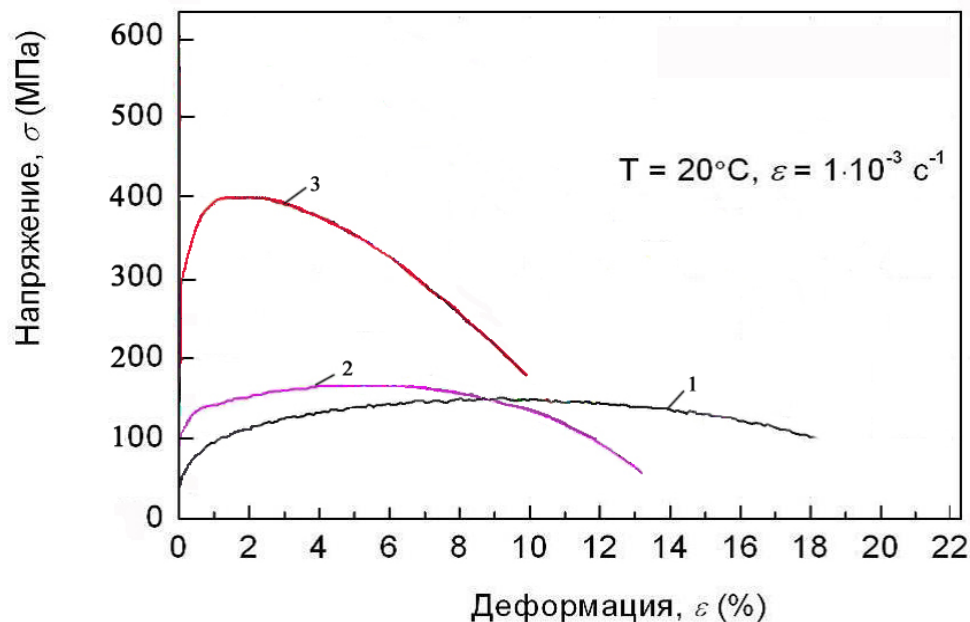
Исследование методом ПЭМ показало, что «прессование-волочение» приводит к существенному измельчению структуры чистого алюминия, по сравнению с традиционным волочением. Полученные зерна равноосны, их размер лежит в интервале от 0,7 до 0,9 мкм. В некоторых случаях они разориентированы друг относительно друга на малый угол. Вместе с тем встречаются отдельные зерна, окруженные большеугловыми границами с характерным для равновесного состояния границ полосчатым контрастом. В структуре же полученной традиционным волочением большеугловых границ не наблюдается, так как именно в матрице происходит деформация сдвигом, при прохождении заготовки через зону пересечения каналов, в результате чего в заготовке накапливается сдвиговая деформация, приводящая к образованию в материале большеугловых границ [130].

Возможно, это связано с активно проходящими при волочении процессами динамической рекристаллизации, обеспеченной достижением критического значения плотности дислокаций и размера зерен.

Результаты испытаний алюминия на растяжения представлены таблицей 5.5 и рисунками 5.11, 5.12.

Таблица 5.5 – Результаты механических испытаний образцов проволоки

Наименование технологии обработки	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi_5$ , %
Исходное	136	108	18,0	57,0
Традиционное волочение	168	121	16,0	46,0
Технология РКУП-В	390	220	11,0	52,0

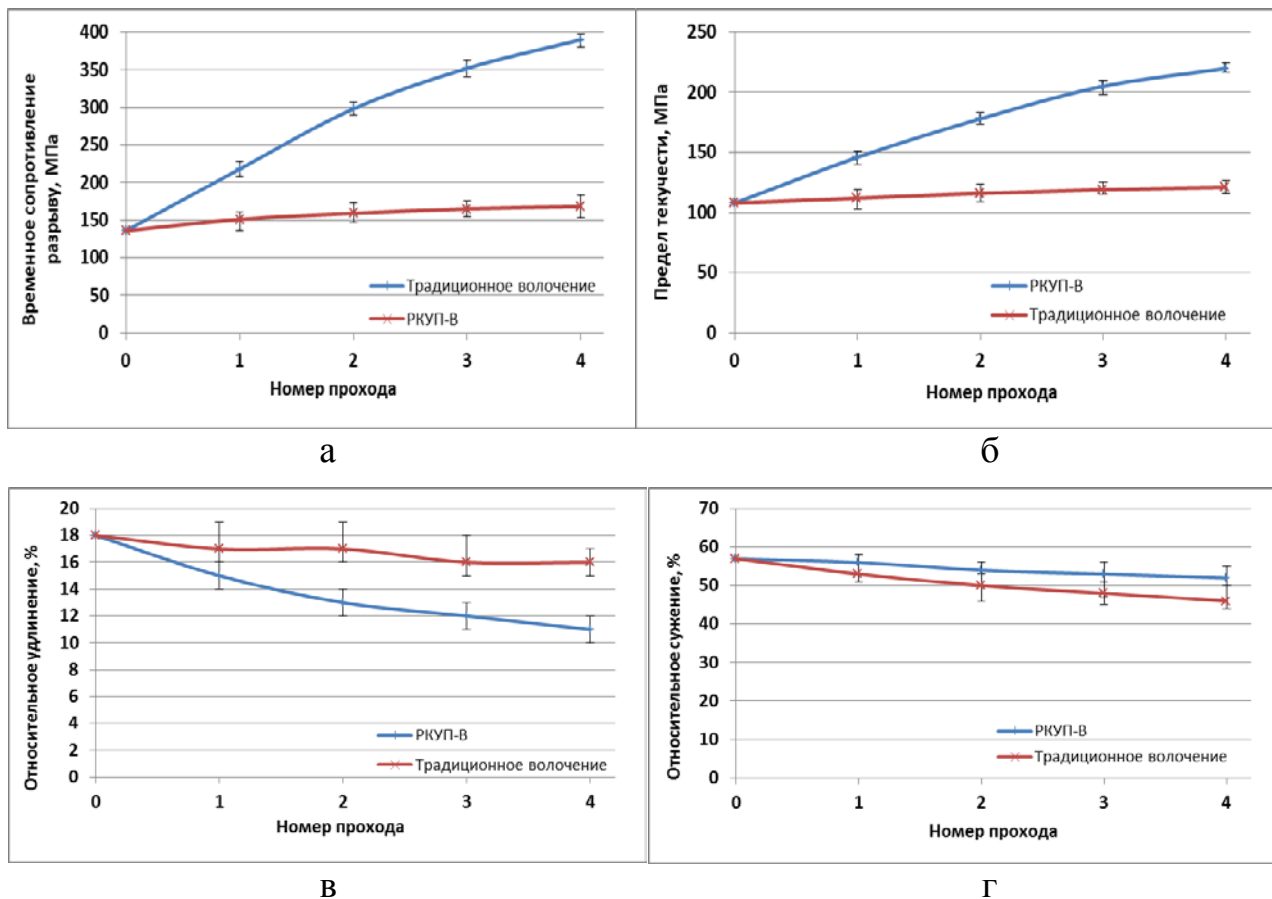


1 – исходное состояние; 2 – волочение; 3 – РКУП-В

Рисунок 5.11 – Диаграммы растяжения образцов проволоки из алюминия



Испытания на растяжение образцов показали, что прочность алюминия повышается после 4 проходов волочения на 48-50%. Временное сопротивление разрыву ( $\sigma_B$ ) увеличивается от 145 МПа в исходном состоянии до 166 МПа после четырех проходов, то есть возрастает только на 15%. Условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) увеличивается от 100 МПа в исходном состоянии до 120 МПа после четырех проходов, то есть возрастает только на 20%.



а – временное сопротивление разрыву; б – предел текучести; в – относительное удлинение; г – относительное сужение

Рисунок 5.12 – Графики зависимости механических характеристик алюминия марки А0 от цикла деформирования

Пластические свойства проволоки в процессе волочения снижаются. Экспериментальные исследования изменения относительного удлинения при испытании на растяжение показали, что уровень пластических свойств алюминия после 4 проходов традиционного волочения падает всего на 2%. Относительное сужение после волочения падает более существенно с 57% до 46% [131].

Испытания на растяжение образцов после 4 проходов РКУП-В показали, что прочность алюминия повышается почти в 3 раза. Временное сопротивление разрыву и условный предел текучести увеличиваются с 145 до 400 МПа

(абсолютный прирост составляет 255 МПа) и с 100 до 360 МПа (абсолютный прирост составляет 260 МПа), соответственно.

Для оценки запаса пластичности воспользуемся показателем равным отношению условного предела текучести к временному сопротивлению разрыву. Чем ближе данный показатель к единице, тем меньшим запасом пластичности обладает металл. Показатель пластичности алюминиевой проволоки составляет 0,56, что говорит о хорошей пластичности проволоки.

После совмещенного процесса РКУП-В относительное удлинение после 4 проходов уменьшается с 18% до 11% при степени деформации  $\varepsilon \sim 80\%$ . Относительное сужение шейки  $\psi$  при степени деформации до 20%, падает от 57% до 55% а затем в интервале  $\varepsilon = 20-40\%$  оно не меняется и при более высоких деформациях ( $\varepsilon = 55-80\%$ ) опять снижается до минимального значения  $\psi = 52\%$ . Это можно объяснить тем, что при деформации до 20% происходит интенсивное упрочнение на первых проходах деформирования, при  $\varepsilon = 20-40\%$  происходит монотонное повышение плотности дислокаций из-за образования ячеистой структуры, что и вызывает снижение интенсивности упрочнения проволоки, а повышение степени деформации до 40% приводит к резкому росту плотности дислокаций и снижению пластичности.

Однако считается, что более корректно оценивать истинную деформацию проволоки до разрушения по величине сужения, что в большей степени отражает физические процессы.

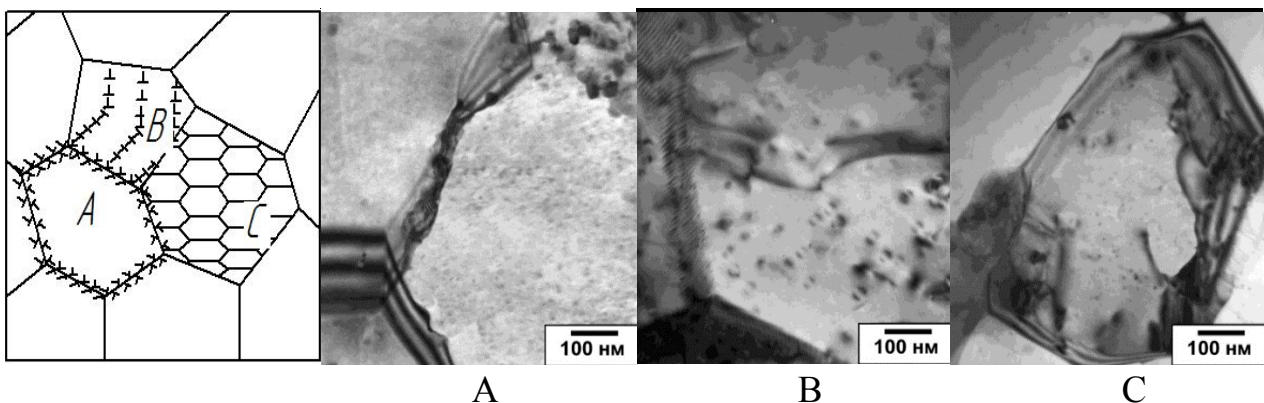
В целом полученные результаты свидетельствуют о том, что для получения длинномерной проволоки с целью существенного повышения комплекса их механических и эксплуатационных свойств процесс РКУП-В является перспективным. Именно данная схема позволит в более полной мере реализовать преимущества традиционного волочения и ИПД.

#### **5.4 Механизм формирования ультрамелкозернистой структуры**

На сегодняшний день известно несколько представлений о формировании ультрамелкозернистой структуры при интенсивной пластической деформации. После проведения металлографического анализа трех совершенно отличных по своей природе металлов, продеформированных методом РКУП-В нами предложена модель эволюции микроструктуры при ИПД, которая отражает переход в процессе интенсивной пластической деформации от ячеистой структуры к зеренной, характеризующейся большеугловыми границами зерен.

В исходной структуре дислокации распределяются однородно по всему телу зерна. Для начальной стадии деформирования характерно возникновение ячеистой структуры, для которой свойственна небольшая плотность дислокаций внутри ячеек по сравнению с их границами и небольшая разориентировка между ними. С увеличением степени деформации размер ячеек мало меняется, а плотность дислокаций на границах возрастает (рисунок 5.13, стадия А). Для развития дислокационного сдвига требуется непрерывное повышение внешних напряжений, так как поля напряжений, создаваемые

несовершенными границами ячеек, противодействуют движению дислокаций. Кроме них к повышению напряжения сдвига приводит рост напряжений, необходимых для генерации решеточных дислокаций в мелких ячейках. При увеличении степени деформации происходит образование клубков и сплетений дислокаций, постепенно заполняющих весь объем исходных зерен. Однородное распределение дислокаций заменяется энергетически благоприятными субзернами. Эти субзеренные стенки представляют собой барьер для распространения дислокаций, а разориентация между соседними зернами постепенно увеличивается с пластической деформацией (рисунок 5.13, стадия В). При дальнейшей деформации плотность дислокаций в стенках становится выше критической. Это приводит к развитию возврата, заключающегося в аннигиляции дислокаций противоположного знака. В результате в стенках ячеек остаются избыточные дислокации двух знаков, которые играют разную роль. Увеличение разориентировок и превращение ячеек в зерна происходит благодаря дислокациям с вектором Бюргерса, перпендикулярным границе. Образование и рост новых границ происходит путем сложных перестроек дислокаций в областях зерен. Эти перестройки включают в себя генерацию дислокаций под совместным действием приложенных напряжений, их скольжение и накопление с образованием границ разориентации. Зарождение новых границ наблюдается именно вблизи стыков или морфологических особенностей исходных границ (ступеньки, уступы, изгибы), после чего новые границы прорастают внутрь зерен и делят их на разориентированные между собой кристаллические элементы (рисунок 5.13, стадия С). Развитие последней стадии связано с протеканием процессов фрагментации структуры во всем объеме материала.



А – увеличение дислокаций по границам зерен; В – дислокации, заблокированные границами субзерен; С – переориентация границ субзерен и образование УМЗ

Рисунок 5.13 – Схема механизма эволюции микроструктуры

Разработанная модель хорошо согласуется со многими экспериментальными фактами, обнаруженными электроно-микроскопическими исследованиями в материалах, подвергнутых интенсивной пластической деформации, а именно: с равноосной формой зерен, значительными искажения-

ми кристаллической решетки и наличием дислокаций высокой плотности в границах зерен.

### 5.5 Оценка соответствия механических свойств проволоки после РКУП-В с требованиями стандартов

В данной главе проведем анализ соответствия механических свойств проволоки после РКУП-В требованиям стандартов для оценки возможности дальнейшего ее применения.

Для сравнения механических свойств проволоки были выбраны следующие стандарты на проволоку:

– ГОСТ 3282-74 «Проволока стальная низкоуглеродистая общего назначения. Термически необработанная без покрытия»;

– ГОСТ 792-67 «Проволока низкоуглеродистая качественная»;

– ГОСТ 5663-79 «Проволока стальная углеродистая для холодной высадки»;

– ГОСТ 2112-79 «Проволока медная круглая электротехническая», в 1990 году взамен ГОСТ 2112-79 разработаны Технические Условия ТУ16.К71-087-90 «Проволока медная круглая электротехническая. Технические условия»;

– ГОСТ 14838-78 «Проволока из алюминия и алюминиевых сплавов для холодной высадки»;

– ГОСТ 839-80 «Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи»;

– ГОСТ Р 57517-2017 «Проволока, тянутая из алюминия и алюминиевых сплавов общего назначения».

На рисунке 5.14 приведены диапазоны изменения временного сопротивления разрыву, которые регламентируются стандартами на проволоку марки Ст.3 по вышеперечисленным ГОСТам. Также представлены значения, полученные после испытаний на растяжения после 4 проходов деформирования традиционным методом волочения и РКУП-В.

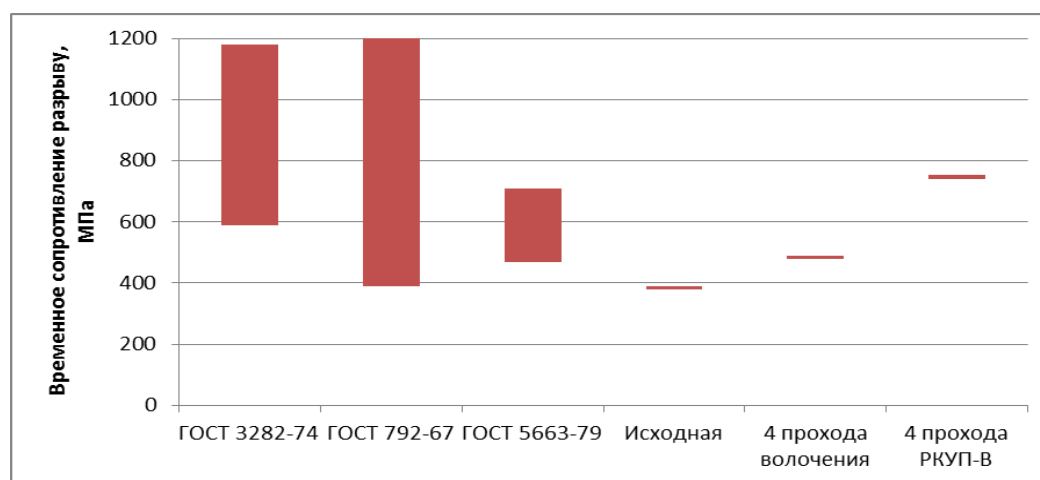


Рисунок 5.14 – Сопоставление временного сопротивления разрыву с требованиями ГОСТов для проволоки из стали марки Ст.3

Как показало сравнение уровня получаемых свойств проволоки полученной разработанным методом, данный метод позволяет достигать требуемого уровня временного сопротивления разрыву по всем приведенным ГОСТам.

Относительное удлинение не регламентируется ГОСТ 792-67 и ГОСТ 5663-79, а ГОСТ 3282-74 регламентирует относительное удлинение только термически обработанной проволоки, но полученное значение  $\delta_5=22\%$  входит в диапазон пластичных металлов.

Относительное сужение регламентируется только ГОСТ 5663-79, результаты сравнения, полученные после испытаний на растяжения, после 4 проходов деформирования традиционным методом волочения и РКУП-В приведены на рисунке 5.15.

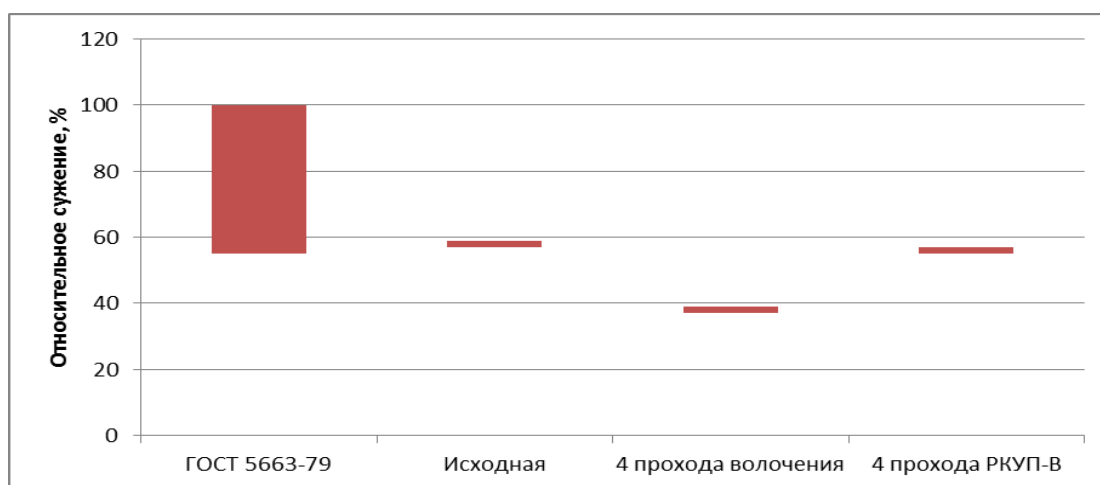


Рисунок 5.15 – Сопоставление относительного сужения с требованиями ГОСТ 5663-79 для проволоки из стали марки Ст.3

Число перегибов регламентируется только ГОСТ 792-67, для проволоки диаметром 5 мм, число перегибов должно составлять – 6, после 4 проходов по предлагаемой технологии число перегибов составляет – 11.

Для медной проволоки ГОСТ 2112-79 регламентирует временное сопротивление разрыву, относительное удлинение и число перегибов. Временное сопротивление разрыву должно быть не менее 373 МПа, после 4 проходов РКУП-В составляет 570 МПа, относительное удлинение для МТ (медная твердая) проволоки составляет 2%, после РКУП-В данный параметр составляет 12%, число перегибов должно быть не менее 5, в нашем случае - 12. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что значения, полученные после 4 проходов РКУП-В, значительно превосходят регламентируемые параметры.

На рисунке 5.16 приведены диапазоны изменения временного сопротивления разрыву, которые регламентируются стандартами на алюминиевую проволоку по ГОСТ Р 57517-2017. Также представлены значения, полученные после испытаний на растяжения после 4 проходов дефор-

мирования традиционным методом волочения и РКУП-В.

Относительное удлинение после деформации методом РКУП-В также входит в диапазон регламентируемый ГОСТ Р 57517-2017.

Все исследуемые марки проволоки, полученные совмещенным методом прессование-волочение, обладают механическими свойствами, превышающими допустимые по стандарту значения. Это дает основание считать метод РКУП-В перспективным для производства проволоки различного назначения.



Рисунок 5.16 – Сопоставление временного сопротивления разрыву с требованиями ГОСТ Р 57517-2017 для алюминиевой проволоки

## 5.6 Разработка рекомендаций по внедрению совмещенного процесса РКУП-В в производство

Разработанная технология позволит получать в промышленных условиях длинномерную проволоку из черных и цветных металлов и сплавов с ультрамелкозернистой структурой и повышенным уровнем механических свойств при меньших энерго- и трудозатратах за счет реализации принципа непрерывности.

Для реализации совмещенного процесса «прессование-волочение» необходимо использовать дополнительную оснастку – равноканальную ступенчатую матрицу, изготовленную в соответствии с разработанным чертежом данной матрицы (рисунок 4.3). Матрицу рекомендуется изготавливать из инструментальной штамповой стали 5ХВ2С. Для повышения твердости и прочности матрица должна быть подвергнута термической обработке – закалке при температурном режиме, который соответствует выбранной марке стали. Диаметр канала выбирается в соответствии диаметра проволоки, подвергаемой волочению. Длины каналов и угол стыка выбирается в соответствии с чертежом на рисунке 4.3, так как результаты теоретических исследований, что предложенные угол стыка каналов и длины каналов обеспечивают наиболее благоприятное напряженно-деформированное

состояние для получения ультрамелкозернистой структуры и меньшие значения энергосиловых параметров.

Для осуществления совмещенного процесса «прессование-волочение» равноканальную ступенчатую матрицу необходимо располагать в контейнере для смазки перед волокой. В качестве смазки при реализации совмещенного процесса РКУП-В, как и при обычном волочении, необходимо использовать стружку мыла.

Поскольку в данной работе была показана необходимость многоциклового деформирования, то реализацию данного совмещенного процесса можно вести по схеме, предложенной в настоящей работе – проводить замену матрицы после каждого цикла деформации.

Для успешного задания проволоки в равноканальную ступенчатую матрицу и избегания обрыва исходной заготовки при осуществлении совмещенного процесса РКУП-В необходимо использовать задающее (заталкивающее) устройство, один из вариантов задающего устройства представлен на рисунке 4.2. При реализации процесса можно использовать переделанный острильный станок от волочильного стана, в частности осуществить перефазировку данного станка, чтобы валки вращались в нужном нам направлении и производили захват проволоки и за счет активных сил трения заталкивание ее в равноканальную ступенчатую матрицу. При этом для успешной реализации совмещенного процесса РКУП-В обязательно необходимо осуществлять согласование скоростей заталкивания и вытягивания проволоки.

Технология производства проволоки по предлагаемой технологии на волочильном стане заключается в следующем: на бунтодержатель навешивается с помощью цеховых транспортных средств садка бунтов заготовки, подготовленной к волочению (травленная, известкованная) до 1000 кг.

С бунтодержателя бунт укладывается на одну из фигурок, и нижний конец заготовки подтягивается к острильному станку для заострения. На острильном станке конец заготовки заостряется до нужного диаметра на длину 150 ... 180 мм. Заостренный конец заготовки подается в заталкивающее устройство, с помощью которого заготовка проталкивается через равноканальную ступенчатую матрицу и волоку, установленную в волокодержателе и захватывается заправочными клещами, крюк которых введен в один из пазов на барабане. Ножной педалью толчками стан включается на заправочную скорость (одновременно запускается и заталкивающее устройство). После набора на барабане 5-7 витков проволоки, стан необходимо остановить. Заправочные клещи снимаются, а конец проволоки надежно закрепляется за одну из стоек барабана. Затем стан и заталкивающее устройство включают на заданную по технологии скорость и работают до заполнения барабана.

После заполнения барабана стан останавливают, дают барабану реверс на 2-3 оборота, проволоку на участке между волокодержателем и барабаном разрезают, и готовый моток грейфером с помощью крана снимают с барабана



стана на стеллаж. Готовый моток сбрасывается на стеллаж для утяжки и опрокидывания бунтов, и грейфер устанавливается обратно в пазы барабана. Возможна увязка бунта при работающем стане.

Управление станом осуществляется с пульта управления.

При многоцикловом совмещенном процессе «прессование-волочение» рекомендуется режим деформирования, приведенный в таблице 5.6 и после первого цикла деформирования в контейнере для смазки менять равноканальную ступенчатую матрицу и волокодержателе волоку для волочения на меньший диаметр.

Таблица 5.6 – Режим деформации проволоки

РКУП					Волочение								
№ прохода	D <sub>0</sub> , мм	V <sub>0</sub> , м/сек	F <sub>0</sub> , мм <sup>2</sup>	ε <sub>ln</sub>	D <sub>1</sub> , мм	D <sub>2</sub> , мм	λ	V <sub>2</sub> , м/сек	V <sub>1</sub> , м/сек	ε, %	F <sub>1</sub> , мм <sup>2</sup>	F <sub>2</sub> , мм <sup>2</sup>	ε <sub>ln</sub>
1 проход	7,0	1,29	38,465	0,6	7,0	6,5	1,16	1,5	1,29	13,78	38,465	33,166	0,12
2 проход	6,5	1,28	33,166	1,2	6,5	6,0	1,17	1,5	1,28	14,79	33,166	28,260	0,13
3 проход	5,5	1,26	23,746	1,8	6,0	5,5	1,19	1,5	1,26	15,97	28,260	23,746	0,14
4 проход	5,0	1,24	19,625	2,4	5,5	5,0	1,21	1,5	1,24	17,36	23,746	19,625	0,16
ε <sub>ln</sub> (сумм)				2,4			ε(сумм), %		48,97	ε <sub>ln</sub> (сумм)		0,39	
ε <sub>ln</sub> (общ) = 2,8													

Данная технология обработки металлов давлением может быть использована для производства высококачественной проволоки из любых цветных металлов и сплавов. Данный способ деформирования при внедрении его в производство не требует значительных экономических вложений и может быть внедрен на промышленных предприятиях Республики Казахстан по производству проволоки так, как он не требует переоборудования существующих волочильных станков. Так как для реализации данного совмещенного процесса требуется только добавление в конструкцию оборудования специально изготовленной равноканальной ступенчатой матрицы, предназначенной для протягивания через нее материала.

## Выводы

Для исследования влияния нового совмещенного способа деформирования «прессование-волочение» на формирование микроструктуры и изменение механических свойств проволоки из черного и цветных металлов были проведены эксперименты по деформированию стали марки Ст.3, алюминия марки А0 и меди марки М1.

В ходе исследования формирования УМЗ структуры и механических свойств в проволоке, полученной методом «прессование-волочение», было установлено следующее:

– в процессе «прессование-волочение» существенно измельчается структура всех исследуемых материалов до ультрамелкозернистой, так сталь марки Ст.3 со средним размером зерна 12 мкм после деформирования

измельчилась в 20 раз, средний размер зерна составил 0,6 мкм; медь марки М1 со средним размером зерна 50 мкм после деформирования измельчилась в 125 раз, средний размер зерна составил 0,4 мкм; алюминий марки А0 со средним размером зерна 17 мкм после деформирования измельчилась в 22 раза, средний размер зерна составил 0,8 мкм. Однородность формируемой структуры и свойств по сечению проволоки после подтверждена результатами измерения микротвердости;

– сочетание метода РКУП с последующим волочением позволяет обеспечивать высокие прочностные характеристики стали марки Ст.3: временное сопротивление разрыву повышается на 360 МПа, условный предел текучести - на 460 МПа относительное сужение после разрыва понижается на 8 %; но падение не такое существенное, как при классическом волочении;

– значения временного сопротивления разрыву и условного предела текучести для медной проволоки после 4 проходов РКУП-В увеличиваются с 260 до 570 МПа (абсолютный прирост составляет 310 МПа) и с 190 до 490 МПа (абсолютный прирост составляет 300 МПа) соответственно;

– прочность алюминиевой проволоки повышается после 4 проходов почти в 3 раза. Временное сопротивление разрыву и условный предел текучести увеличиваются с 145 до 400 МПа (абсолютный прирост составляет 255 МПа) и с 100 до 360 МПа (абсолютный прирост составляет 260 МПа), соответственно; относительное удлинение уменьшается на 7%, относительное сужение на 5%;

– проволока, полученная методом «прессование-волочение» демонстрирует высокую однородность распределения механических свойств материала по длине, по сечению в продольном и поперечном направлении прутка, а также высокую повторяемость результатов;

– механические свойства металлов полученных методом РКУП-В обладают рядом преимуществ по сравнению с другими методами ИПД (РКУП, РКУ-протяжка). Обработка металлов данным методом приводит к увеличению пластических характеристик (количество перегибов, относительное сужение после разрыва) при росте временного сопротивления разрыву и условного предела текучести, что свидетельствует о повышении ресурса пластичности материалов;

– проверка уровня механических свойств проволоки, полученной совмещенным методом РКУП-В с требованиями действующих в настоящее время стандартов на проволоку показало, что все исследуемые марки проволоки, полученные совмещенным методом прессование-волочение, обладают механическими свойствами, превышающими допустимые по стандарту значения. Это дает основание считать метод РКУП-В перспективным для производства проволоки различного назначения.

Полученные результаты экспериментальных и теоретических исследований позволяют прогнозировать изменения комплекса механических свойств исследуемых металлических материалов при сочетании метода РКУП с последующим волочением и являются значимыми для разработки новых технологий при производстве металлических изделий повышенной прочности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований можно сделать вывод о том, что предлагаемый совмещенный способ деформирования «РКУ-прессование - волочение» обладает существенным преимуществом по сравнению с ранее известными способами получения металла с ультрамелкозернистой структурой. Данный способ деформирования, за счет совмещения двух способов: интенсивной пластической деформации в равноканальной ступенчатой матрице и процесса волочения, позволяет получать проволоку требуемых размеров и формы поперечного сечения, обладающую ультрамелкозернистой структурой. А также снимает ограничения по длине исходной заготовки, а, следовательно, позволяет получать готовые изделия длиной до нескольких десятков метров.

Получены следующие наиболее важные результаты, отражающие научную новизну и практическую значимость проведенных исследований:

1) на основе проведенных теоретических исследований и моделирования процесса прессования-волочения по заранее выбранным параметрам и условиям процесса составлена, конечно-элементная, модель устройства для совмещенного процесса, включающая в себя равноканальную ступенчатую матрицу и волоку. Исследованы и проанализированы такие параметры как эквивалентные деформации, логарифмические деформации сдвига; максимальные напряжения, возникающих в очаге деформации и вне зоны деформации. Также была рассмотрена кинематическая схема процесса, проанализирован график распределения поврежденности в процессе РКУ-прессования -волочения, по результатам которого, значения поврежденности не превышают критических, на протяжении всего процесса;

2) разработана новая технология деформирования проволоки «РКУ-прессование-волочение», отличительной особенностью которой является совмещение схемы растяжения и схемы сдвига в одном очаге деформации, которая является более эффективной, чем ранее известные способы получения металла с ультрамелкозернистой структурой. Так на примере стали и цветных металлов, деформированных с помощью процесса прессование-волочение, показано, что совмещение технологии РКУП и традиционного волочения приводит к формированию структуры с мелким, однородным, равноосным зерном с преимущественно большеугловыми границами. Достичь данных результатов позволило применение сдвиговых деформаций, происходящих в равноканальной матрице, которые привели к формированию структуры материала, отличной от сформированной стандартными методами;

3) показано, что при деформировании проволоки по предлагаемой совмещенной технологии «прессование-волочение» уже после четырех проходов деформирования происходит существенное измельчение структуры стали марки Ст.3 и чистых меди и алюминия, по сравнению с традиционным волочением и не только на поверхности, но и в центре проволоки. При этом значительно в меньшей степени выражена текстура, а соответственно и

анизотропия, так как, несмотря на высокое число эквивалентных систем скольжения в ГЦК решетке характер кристаллографических текстур, формирующихся в результате прессования-волочения, зависит от сдвиговой деформации, проходящей в канале матрицы после каждого прохода, которая позволяет дополнительно фрагментировать структуру;

4) показано, что в результате больших деформаций зеренная структура металла достигла уровня УМЗ, а сама проволока оказалась в большой степени текстурованной, как за счет очень высокого уровня деформаций, так и за счет отсутствия промежуточных отжигов, последнее диктуется энерго- и ресурсосбережением;

5) установлено, что после деформирования методом РКУП-В проволока имеет повышенный запас пластичности по сравнению с традиционным процессом волочения, что позволяет проводить ее дальнейшую переработку с большими степенями деформации без проведения промежуточных отжигов;

6) показано, что при внедрении данного способа деформирования в производство не потребуются значительных экономических вложений так, как он не требует переоборудования существующих волочильных станков, требуется только добавление в конструкцию оборудования специально изготовленной равноканальной ступенчатой матрицы, предназначенной для протягивания через нее материала.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Лежнев С.Н., Волокитина И.Е., Волокитин А.В. Влияние процесса прессование-волочение на изменение структуры и механических свойств стали // Сталь. – 2017. – № 3. – С. 44-48.

2 Гулин А.Е. Разработка процесса изготовления углеродистой проволоки с повышенными механическими свойствами методом комбинированной пластической деформации: автореф. ... канд. техн. наук: 05.16.05. – Магнитогорск, 2014. – 19 с.

3 Хомская И.В. Фазовые и структурные превращения в сплавах на основе железа и меди при интенсивных ударно-волновых и деформационных воздействиях: дис ... докт. техн. наук: 05.16.01. – Екатеринбург, 2014. – 299 с.

4 Луценко В. А. Научные основы совершенствования термомеханической обработки катанки для стальной проволоки малого диаметра: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.01. – Днепропетровск, 2015. – 353 с.

5 Волокитина И.Е., Волокитин А.В., Богатов А.А. Исследование влияния процесса «прессование-волочение» на свойства биметаллической проволоки // Труды IX Международной научно-практической конференции «Третья модернизация Казахстана – новые концепции и современные решения», Темиртау. – 2017. – С. 90-95.

6 Разработка и исследование совмещенного процесса деформирования «прессование – волочение» с целью получения алюминиевой и медной проволоки с высокими механическими свойствами и ультрамелкозернистой структурой Республики Казахстан: отчет о НИР (заключительный) / РГП «КарГИУ»: рук. Найзабеков А.Б.; исполн.: Лежнев С. Н., Волокитин А. В., и др. – Темиртау, 2014. – 61 с. – № ГР 0112РК02872.

7 Рааб Г.И., Шибиков В.Г., Рааб А.Г. Перспективные методы ИПД для получения наноструктурированных металлических материалов // Materials Physics and Mechanics. – 2016. – № 25. – С. 72-82.

8 Столяров В.В. Деформационные методы измельчения структуры // Вестник научно-технического развития. – 2013. – № 4. – С. 29-36.

9 Бриджмен П.У. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. – М.: Иностранная литература, 1955. – 444 с.

10 Пашинская Е.Г. Физико-механические основы измельчения структуры при комбинированной пластической деформации. Донецк: Изд-во: Вебер, 2009. – 352 с.

11 Харитонов В. А., Усанов М. Ю. Реализация деформации кручения в производстве проволоки с ультрамелкозернистой структурой // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2015. – № 1. – С. 38-43.

12 Бейгельзимер Я.Е. Новые схемы накопления больших пластических деформаций с использованием гидроэкструзии // Физика и техника высоких давлений. – 1999. – № 9 (3). – С. 109-111.

13 Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации. – Донецк: Фирма ТЕАН, 2003. –

87 с.

14 Бейгельзимер Я.Е., Сынков С.Г., Орлов Д.В., Решетов А.В. Винтовая экструзия // Журнал Кузнечно-штамповочное производство. – 2004. – № 6. – С. 15-22.

15 Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.

16 Утяшев Ф.З., Рааб Г.И. Влияние очага деформации на измельчение структуры в металлах // Физика металлов и металловедение. – 2007. – № 6. – С. 104-109.

17 Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Волокитина И.Е. Изменения микроструктуры и механических свойств меди при деформировании в равноканальной ступенчатой матрице // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2015. – № 5. – С. 12-17.

18 Макаров И.М., Нохрин А.В., Чувильдеев В.Н., Копылов В.И. Рекристаллизация в нано и микрокристаллических металлах, полученных методами интенсивного пластического деформирования // Вестник Нижегородского уни-та им. Н.И. Лобачевского. – 2001. – № 1 (4). – С. 136-151.

19 Чувильдеев В.Н., Нохрин А.В., Пирожникова О.Э., Грязнов М.Ю., Лопатин Ю.Г., Смирнова Е.С. Физика новых материалов: учебное пособие. – Н. Новгород: ННГУ, 2010. – 105 с.

20 Найзабеков А.Б., Ашкеев Ж.А., Лежнев С.Н., Толеуова А.Р. Исследование процесса деформирования заготовок в равноканальной ступенчатой матрице // Изв. вузов Черная металлургия. – 2005. – № 2. – С. 16-18.

21 Рааб Г.И. Развитие методов интенсивной пластической деформации для получения объемных ультрамелкозернистых материалов // Вестник УГАТУ. – 2004. – № 3 (11). – С. 67-86.

22 Raab, G.I. Plastic flow at equal channel angular processing in parallel channels // Materials Science and Engineering. – 2005. – 230 p.

23 Столяров В.В. Деформационные методы измельчения структуры // Вестник научно-технического развития. – 2013. – № 4 (68). – С. 29-36.

24 Рааб Г.И. Развитие способа равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. – Уфа, 2009. – 36 с.

25 Stolyarov V.V. Ultrafine - grained Al-5 wt.% Fe alloy processed by ECAP with backpressure // Materials Science and Engineering. – 2003. – № 357. – P. 159-167.

26 Salischev G.A., Galeev R.M., Malysheva S.P., Myshlyayev M.M. // Nanostruct. Mater. – 1999. – 407 p.

27 Salishchev G.A., Valiakhmetov O.R., Galeev R.M. // Journal of Materials Science. – 1993. – Vol. 28. – P. 2898-2902.

28 Salischev G.A., Galeev R.M., Malysheva S.P., Myshlyayev M.M. Structure and density of submicrocrystalline titanium produced by severe plastic deformation //

Nanostruct. Mater. – 1999. – № 3. – P. 407-414.

29 Salishchev G.A., Valiakhmetov O.R., Galeev R.M. Formation of submicrocrystalline structure in the titanium alloy VT8 and its influence on mechanical properties // J. Mat. Sci. – 1993. – № 28. – P. 2898-2902.

30 Маркушев М.В. К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов // Письма о материалах. – 2011. – Т 1. – С. 36-42.

31 Тихонова М.С. Рекристаллизационные процессы в аустенитной коррозионностойкой стали после больших пластических деформаций: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. – М., 2015. – 138 с.

32 Пат. 4721537 США. Method of producing a fine grain aluminum alloy using three axes deformation / Ghosh A.K., Calif T.O.; опубли. 26.01.88, Бюл. № 16. – 7 с.

33 Фахретдинова Э.И. Разработка нового комбинированного процесса получения алюминиевых деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. – Красноярск, 2017. – 143 с.

34 BWE Ltd // www.bwe.co.uk. 15.03.18.

35 С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Н.Н. Загиров. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 344 с.

36 Fastyskovskii A.R. Region for extruding feasibility and effective deformation modes // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2011. – Vol. 52, Iss. 3. – P. 230-233.

37 Горохов Ю.В., Шеркунов В.Г., Константинов И.Л. Методология исследования совмещенного процесса непрерывного литья и прессования металлов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 82-88.

38 Лекция №4. Общие сведения и виды прессования. Прессование на горизонтальных гидравлических прессах. Полунепрерывное и непрерывное прессование // sdanzavas.net. 15.03.18.

39 Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Панин Е.А. Теоретические исследования новой технологии деформирования – совмещенного процесса «прокатка-прессование» // 6-я междунар. молодежная науч.-прак. конф. «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А.Ф. Головина». – Екатеринбург, 2012. – С. 693-696.

40 Avitzur, B. Extruding: Combine Extrusion and Rolling // Wire Technology. – Vol.3, №2. – P. 55-58.

41 Пат. 2519078 Российская Федерация. Способ совмещенного литья, прокатки и прессования и устройство для его реализации / Рааб Г.И., Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Гималтдинова Э.И.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «НаноMeT»;



опубл. 10.06.2014, Бюл. № 36. – 4 с.

42 Рааб Г.И., Фахретдинова Э.И., Валиев Р.З. Разработка и исследование метода СЛИПП-ИПД для получения алюминиевых полуфабрикатов высокого качества // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». – 2014. – Т. 7, № 3. – С. 309-315.

43 Пат. 2457914 Российская Федерация. Устройство для непрерывного литья. Прокатки и прессования цветных металлов и сплавов / Баранов В.Н., Ворошилов Д.С., Галиев Р.И., Довженко И.Н., Довженко Н.Н., Лопатина Е.С., Сидельников С.Б., Солдатов С.В.; опубл. 10.08.2012, Бюл. – 5 с.

44 Пат. 6895795 В21С 23/00 США, Continuous severe plastic deformation process for metallic materials / Prabir K., Chaudhury R.S., Srinath V.; опубл. 24.05.2005, Бюл. № 45. – 12 с.

45 Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Панин Е.А. Сравнительный анализ процесса «прокатка-прессование» в равноканальной ступенчатой матрице при использовании калиброванных валков и валков с гладкой бочкой // Технология производства металлов. – 2007. – С. 116-122.

46 Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Панин Е.А. Исследование влияния геометрических и технологических факторов на деформированное состояние металла при осуществлении совмещенного процесса прокатка-прессование с использованием равноканальной ступенчатой матрицы и калиброванных валков // Вестник Жезказганского университета им. Байконурова. – Жезказган, 2009. – № 1. – С. 40-48.

47 A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin, I. Volokitina. The Role of Preliminary Heat Treatment in the Formation of Ultrafine-Grained Structure in the Implementation of the Combined Process «Rolling – Equal Channel Angular Pressing» // Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 879. – P. 1093-1098.

48 Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Панин Е.А. Теоретические и экспериментальные исследования процесса деформирования на основе совмещения прокатки и равноканального ступенчатого прессования. XVI International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering». – Czestochowa, 2015. – P. 192-197.

49 Naizabekov, A., Lezhnev, S., Arbuz, A., Panin, E. Combined process «helical rolling-pressing» and its effect on the microstructure of ferrous and non-ferrous materials // Metallurgical Research and Technology. – 2018. – № 3. – P. 44-48.

50 Naizabekov, A., Lezhnev, S., Arbuz, A. Combined process of helical rolling with equal-channel angular pressing // METAL 2013 - 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. – 2013. – P. 422-426.

51 Naizabekov A., Legev S., Talmazan V., Arbuz A. Study of axial forces with the purpose to realize a combined process «helical rolling-pressing» // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2015. – Vol. 115, № 213. – P. 217-222.

52 Виды проволоки и ее применение // psbaza.ru. 15.03.18.

53 Медная проволока. Области применения // fb.ru. 15.03.18.

- 54 Проволока // [www.kmzsibmash.ru](http://www.kmzsibmash.ru). 15.03.18.
- 55 Технология производства алюминиевой проволоки // [promzn.ru](http://promzn.ru). 15.03.18.
- 56 Электроэнергетика Казахстана // [bourabai.kz](http://bourabai.kz). 15.03.18.
- 57 Воронцова, Л.А. Алюминий и алюминиевые сплавы в электротехнических изделиях / Л.А. Воронцова, В.В. Маслов, И.Б. Пешков. – М.: Энергия, 1971. – 224 с.
- 58 Пат. 2467816 Российская Федерация. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением с кручением / Чукин М.В., Полякова М.А., Голубчик Э.М. и др.; опубл. 27.11.2012, Бюл. № 33. – 4 с.
- 59 Пат. 130525 Российская Федерация. Устройство для изготовления проволоки с ультрамелкозернистой структурой / Полякова М.А., Чукин М.В., Голубчик Э.М., Гулин А.Е.; опубл. 27.07.2013, Бюл. № 33. – 4 с.
- 60 Чукин М.В., Полякова М.А., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г. Влияние комбинированных методов обработки на механические свойства углеродистой проволоки // Черные металлы. – 2014. – № 12. – С. 35-39.
- 61 Пат. 2446027 Российская Федерация. Способ получения длинномерных заготовок круглого поперечного сечения с ультрамелкозернистой структурой / Чукин М.В., Емалеева Д.Г., Барышников М.П., Полякова М.А.; опубл. 27.03.2012, Бюл. № 33. – 4 с.
- 62 Чукин М.В., Емалеева Д.Г. Проектирование инструмента для равноканальной угловой протяжки проволоки // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – №10. – Ч.2. – С. 62-67.
- 63 Чукин М.В., Емалеева Д.Г. Влияние термической обработки на эволюцию структуры и свойств стальной проволоки в процессе РКУП протяжки // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2008. – №2. – С. 70-71.
- 64 Muszka K., Wielgus M., Majta J., Doniec K., Stefanska-Kacziela M. Influence of strain path changes on microstructure inhomogeneity and mechanical behavior of wire drawing products // Mater. Sci. Forum. – 2010. – P. 314-317.
- 65 Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Анализ способов непрерывного наноструктурирования проволоки // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2015. – № 1. – С. 50-61.
- 66 Hollmann. Das Schubwalzen – Ein neues Walzverfahren // Technika. – 1979. – Т. 28, № 21. – P. 1845-1846.
- 67 Continuous Severe Plastic Deformation Processing of Aluminum Alloys: отчет о НИР (конечный). Wright State University. Ohio. USA. DOE Award Number: DE-FC36-01ID14022. – 2006. – 59 p.
- 68 Пашинская Е.Г., Завдоев А. З. Применение прокатки со сдвигом и традиционного волочения для формирования структуры и свойств малоуглеродистых сталей // Физика и техника высоких давлений. – 2012. – Т. 22, № 3. – С. 113-124.
- 69 Пат. 224787 Испания. Proceso para el estirado de materiales metálicos en canal poliangular / Perez L., Javier U., Perez-Illarbe; опубл. 16.04.2005. – 7 с.
- 70 Chakkingal U., Suriadi A., Thomson P. The development of microstructure

and the influence of processing route during equal channel angular drawing of pure aluminum // *Materials Science and Engineering*. – 1999. – Vol. 266. – P. 241-249.

71 Азбанбаев Э.М. Разработка и исследование непрерывного процесса прессования – волочения с целью получения изделий с ультрамелкозернистой структурой: маг. техн. наук: 05.16.05. – Темиртау, 2011. – 124 с.

72 Найзабеков А.Б., Азбанбаев Э.М. Математическое моделирование процесса равноканального углового волочения в ступенчатом инструменте // *Технология производства металлов и вторичных материалов*. – 2011. – № 1. – С. 178-186.

73 Корчунов А. Г., Полякова М. А., Гулин А. Е. Оценка эффективности метода непрерывного деформационного наноструктурирования проволоки // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. – 2013. – Т.13, № 1 – С. 123-128.

74 Перлин И.Л., Ермаков М.З. Теория волочения. – М.: *Металлургия*, 1971. – 448 с.

75 Бойко А.Б. Совершенствование методики расчета напряженно-деформированного состояния в процессе волочения на основе учета неоднородности структуры металла: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. – Магнитогорск, 2015. – 112 с.

76 Yada H., Matsuzu N., Nakajima K., Watanabe K., Tokita H. Strength and Structural Changes under High Strain-rate Hot Deformation of C Steels // *Trans. ISIJ*. – 1983. – № 23. – P. 100-109.

77 Получение высококачественных материалов совмещением термической обработки и интенсивной пластической деформации Республики Казахстан: отчет о НИР (заключительный) / РГП «КарГИУ»: рук. Лежнев С.Н.; исполн.: Найзабеков А.Б., Карипбаева А.Р., Волокитина И.Е. и др. – Темиртау, 2014. – 61 с. – № ГР 0112РК02872.

78 Волокитин А.В., Курапов Г.Г., Волокитина И.Е., Панин Е.А. Моделирование совмещенного процесса прессование-волочение // *Республиканский научный журнал. Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан*. – 2017. – №2 – С. 96-101.

79 Емалеева Д.Г. Разработка технологии и инструмента для непрерывного деформационного получения ультрамелкозернистой структуры стального сердечника при производстве высокопрочной сталемедной проволоки: авт. ... канд. техн. наук: 05.03.05. – Магнитогорск, 2009. – 20 с.

80 Naizabekov A., Volokitin A., Volokitina I., Panin E., Knapinski M. Development and research of combined process of «equal channel angular pressing – drawing» // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2017. – Vol. 52, №2. – P. 172-179.

81 Volokitin A., Naizabekov A., Bogatov A., Leshchev I., Kozlov V. Development and research of combined process of equal channel angular pressing – drawing // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2016. – Vol. 51, №4. – P. 417-426.

82 Панин Е.А. Разработка и исследование нового инновационного про-

цесса «прокатка – прессование» для получения ультрамелкозернистой структуры металла: дис. PhD. – Болгария, 2017. – 161 с.

83 Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Панин Е.А., Арбуз А.С. Моделирование совмещенного процесса «винтовая прокатка-прессование» в программном комплексе simufact.forming // *Обработка сплошных и слоистых материалов.* – 2015. – № 1. – С. 38-43.

84 Алиева Л.И., Огородников В.А. Влияние гидростатического давления и истории его изменения на пластичность в задачах обработки металлов давлением // *Известия Тульского государственного университета.* – 2014. – Вып. 10, Ч. 1. – С. 118-128.

85 Рааб Г.И., Александров И.В., Будилов И.Н. и др. Влияние технологических факторов на деформированное состояние при равноканальном угловом прессовании. Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов: Сборник статей. – Уфа, 2001. – С. 295-301.

86 Valiev R. Z., Langdon T. G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // *Progress in Materials Science.* – 2006. – №51. – P. 881–981.

87 *Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник* / В. С. Кушнер, А. С. Верещака, А. Г. Схиртладзе, В. А. Горелов, Д. А. Негров, О. Ю. Бургонова; под ред. В. С. Кушнера. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. – 520 с.

88 Сухоруков С. И. Оценка использованного ресурса пластичности при поперечно-клиновой прокатке // *Обработка материалов давлением.* – Краматорск ДГМА, 2008. – № 1 (19) – С. 39-44

89 Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Панин Е.А., Койнов Т.А. Разработка и моделирование усовершенствованного совмещенного процесса «прокатка – равноканальное угловое прессование» // *Обработка сплошных и слоистых материалов.* 2016. – № 2. – С. 25-28.

90 Температура и скорость волочения проволоки // [metallobook.ru](http://metallobook.ru). 05.07.18.

91 Rajputa S.K.; Chaudhari G.P.; Nath S.K. Characterization of hot deformation behavior of a low carbon steel using processing maps, constitutive equations and Zener-Hollomon parameter // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2016. – Vol. 237. – P. 113-125.

92 Lenard J.G., Pietrzyk M., Cser L. *Mathematical and Physical Simulation of the Properties of Hot Rolled Products.* – Amsterdam: Elsevier, 2005. – 376 p.

93 Lenard J.G. *Primer on Flat Rolling.* 2nd Edition. – Amsterdam: Elsevier, 2013. – 450 p.

94 Лежнев С.Н., Волокитина И.Е., Волокитин А.В. Изменение структуры медной проволоки при деформации методом «прессование-волочение» // *Обработка материалов давлением.* – Краматорск ДГМА, 2017. – № 2 (45) – С. 123-128.

95 Xiaolian Zhao, Na Chen, Ningning Zhao. Numerical Simulation of equal

channel angular pressing for multi-pass in different routes // Appl. Mech. Mater. – 2012. – P. 373-377.

96 Naizabekov A., Lezhnev S., Panin E., Volokitina I. New Combined Technology of Deformation «Rolling-Equal Channel Angular Pressing», Allowing to Obtain Metals and Alloys with Sub-Ultra-fine-Grained Structure // Severe Plastic Deformation Techniques. InTech. – 2017 // intechopen.

97 Влияние различных факторов на силу и напряжение волочения // studref.com. 07.07.18.

98 Федосьев В.И. Соппротивление материалов. – М.: Наука, 1967. – 552 с.

99 Лежнев С.Н., Волокитина И.Е., Волокитин А.В. Эволюция микроструктуры и механических свойств стали в процессе «прессование–волочение» // Металловедение и термическая обработка. – 2017. – Т. 118, № 11. – С. 1236-1240.

100 Колачев А.Б., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: Metallurgy, 1972. – 480 с.

101 Пашинская Е.Г. Сравнительный анализ изменений структуры и свойств меди после прокатки по стандартной и экспериментальной технологиям // Физика и техника высоких давлений. – 2006. – Т. 16, № 1. – С. 95-105.

102 Золоторевский, В.С. Механические испытания материалов. – М.: Metallurgy, 1983. – 352 с.

103 Методы и средства измерений, испытаний и контроля // www.webkursovik.ru. 29.10.18.

104 Шлифовально-полировальный станок Tegra Pol – Tegra Force: руководство по эксплуатации. – М.: ЗАО «Мелитэк», 2012. – 12 с.

105 Попилов Л.Я. Электрополирование и электротравление металлографических шлифов / под рук. Л.Я. Попилова, Л.П. Зайцева. – М.: Metallurgy, 1963. – 409 с.

106 Панченко Е.В., Скаков Ю.А., Кример Б.И., Арсентьев П.П. Лаборатория металлографии. – М.: Metallurgy, 1965. – 440 с.

107 Симачёв А.С., Осколкова Т.Н. Приготовление металлографического шлифа: методические указания для выполнения лабораторных работ. СибГИУ. – Новокузнецк, 2015. – 16 с.

108 Методика проведения испытаний // studopedia.info. 16.09.18.

109 Волокитина И.Е. Разработка технологии физико-механического упрочнения металлов и сплавов с помощью пластической деформации: дис. PhD. – Алматы, 2016. – 159 с.

110 Zhilyaev A.P., Gimazov A.A., Raab G.I., Langdon T.G. Research article Abstract only Using high-pressure torsion for the cold-consolidation of copper chips produced by machining // Materials Science and Engineering A. – 2008. – №486. – P. 123-126.

111 Поляков А.В. Эволюция микроструктуры и механических свойств технически чистого титана при равноканальном угловом прессовании по схеме «Конформ»: дис ... кан. техн. наук: 05.16.01. – УФА, 2015. – 148 с.

112 ГОСТ СССР 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – Введ. 01.01.77. – М.: Издательство стандартов, 1993. – 34 с.

113 Курапов Г.Г., Лежнев С.Н., Волокитина И.Е., Волокитин А.В., Орлова Е.П. Новый совмещенный процесс «прессование-волочение» и его влияние на свойства деформируемой алюминиевой проволоки // Вестник КазНУ. 2017. №4 (122). С.85-90.

114 Naizabekov A., Legnev S., Volokitina I., Volokitin A., Kurapov G., Knapinski M. Change in steel microstructure in the process «pressing-drawing» // XIX International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy and material engineering and production engineering and physics». – Poland, 2018. – P. 10-13.

115 Лежнев С.Н., Курапов Г.Г., Кнапиньски М.Я., Волокитин А.В., Волокитина И.Е. Исследование влияния нового совмещенного процесса деформирования «прессование-волочение» на микроструктуру деформируемой алюминиевой проволоки // Труды международных Сатпаевских чтений «научное наследие Шахмардана Есенова» Алматы 2017. С. 595-598.

116 Lezhnev S. N., Volokitin A.V., Volokitina I. E. Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of Steel during Pressing–Drawing // Physics of Metals and Metallography. – 2017. – Vol. 118, № 11. – P. 1167-1170.

117 Курапов Г.Г., Волокитина И.Е., Волокитин А.В., Удербаетова А.Е. Эволюция микроструктуры стали при совмещенном процессе «прессование-волочение» // Республиканский научный журнал. Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан. – 2017. – №2 – С. 103-109.

118 Kurapov G. G., Volokitin A.V., Volokitina I. E., Orlova E. P. Research of a new method of deformation – «pressing-drawing» on mechanical properties of steel wire // Bulletin of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2017. – №2. – P. 23-30.

119 Амирханова Н.А., Кутнякова Ю.Б. Исследование влияния маршрутов равноканального углового прессования на выходные параметры ЭХО ультрамелкозернистой меди // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 5, вып.11. – С. 85-88.

120 Сенникова Л.Ф., Давиденко А.А., Спусканюк В.З., Бурховецкий В.В., Слива К.И., Закорецкая Т.А. Поврежденность медной проволоки в процессе больших пластических деформаций // Вопросы материаловедения. – 2014. – Т. 80, № 4. – С. 73-78.

121 Spuskanyuk V., Davydenko O., Berezina A., Gangalo O., Sennikova L., Tikhonovsky M., Spiridonov D. Effect of combining the equal-channel angular hydroextrusion, direct hydroextrusion and drawing on properties of copper wire // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Vol. 210. – P. 1709-1715.

122 Divinski S., Ribbe J., Schmitz G., Rosner M., Lapovok R., Estrin Y., Wilde G. Effect of back pressure during equal-channel angular pressing on deformation-induced porosity in copper // Scripta Mater. – 2013. – Vol. 68, № 12. – P. 925-928.

123 Naizabekov A., Lezhnev S.N., Volokitin A., Volokitina I., Panin E. Analysis of the influence of new combined process «Equal channel angular pressing-drawing» on the microstructure and properties of copper wire // International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT). – 2015. – Vol.5 – P. 24-28.

124 Nayzabekov A.B., Lezhnev S.N., Volokitina I.E. Features of change of the structure and mechanical properties of steel at ECAP depending on the initial state // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2017. – Vol. 52, № 4. – P. 626-635.

125 Samaee M., Najafi S., Eivani A.R., Jafarian H.R., Zhou J. Simultaneous improvements of the strength and ductility of fine-grained AA6063 alloy with increasing number of ECAP passes // Materials Science and Engineering. A. – 2016. – Vol. 669. – P. 350-357.

126 Kawasaki M., Horita Z., Langdon T. G. Microstructural Evolution in High Purity Aluminum Processed by ECAP // Materials Science and Engineering A. – 2009. – P. 143-150.

127 Volokitina I.E., Volokitin A.V. Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of copper during Pressing–Drawing // Physics of Metals and Metallography. – 2018. – Vol. 119, № 9. – P. 917-921.

128 Волокитина И.Е., Волокитин А.В. Эволюция микроструктуры и механических свойств меди в процессе «прессование–волочение» // Физика металлов и металловедение. – 2018. – Т.119, № 9. – С. 971-976.

129 Nayzabekov A.B., Lezhnev S., Volokitina I. E., Volokitin A. V. Microstructural evolution and mechanical properties of aluminum in the process «pressing-drawing» // The International Scientific Congress «Machines. Technologies. Materials». – Proceedings, 2018. – Vol. 1. – P. 59-61.

130 Nayzabekov A.B., Kurapov G.G., Volokitin A. V., Knapieński M.J. Influence of the process, «pressing-drawing» on the microstructures of deformable aluminum wire // XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics». – Poland, 2017. – P. 230-233.

131 Volokitina I., Kurapov G., Volokitin A., Mahato M., Suleimenov E. Reality of structure and mechanical properties of aluminum in the process «pressing-drawing» // International conference on recent advances in metallurgy for sustainable development. IC-RAMSD. – India, 2018. – 7 p.



*НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ*

**Волокитин Андрей Валерьевич, Найзабеков Абдрахман Батырбекович,  
Лежнев Сергей Николаевич, Волокитина Ирина Евгеньевна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ  
СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ,  
ПОДВЕРГНУТЫХ ПРЕССОВАНИЮ В РАВНОКАНАЛЬНОЙ  
СТУПЕНЧАТОЙ МАТРИЦЕ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ВОЛОЧЕНИЕМ**

*Монография*

Подписано к печати 20.02.2019 года. Формат 60×84 1/16  
Объем 7,4 п.л. Тираж 300 экз. Заказ №52.