



На правах рукописи

**ГОЛОВНИН Максим Александрович**

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ  
СПЛАВОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУЧЕННОГО  
ПРОДУКТА**

05.16.05 – Обработка металлов давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

Работа выполнена на кафедре «Обработка металлов давлением» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Логинов Юрий Николаевич**

**Официальные оппоненты:** **Лехов Олег Степанович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», г. Екатеринбург, профессор кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии;

**Веретенникова Ирина Андреевна**, кандидат технических наук, ФГБУН Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, научный сотрудник лаборатории микромеханики материалов

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск

Защита состоится «20» декабря 2018 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.04 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=285867>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета

Селиванова Ольга Владимировна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Алюминиевые сплавы обладают уникальным уровнем свойств, в том числе низкой плотностью и высокой удельной прочностью. Это предопределило их применение в элементах конструкций, связанных с функционированием летательных аппаратов. Борьба за снижение энергопотребления в транспортной технике в последнее время привела к мысли о том, что любые транспортные средства, а не только летательные аппараты, должны иметь малую массу. Поэтому в последнее время активизированы разработки, направленные на замену относительно тяжелых стальных конструкций на легкосплавные (алюминий, магний и их сплавы). Недаром в перечень критических технологий Российской Федерации от 01 июля 2011 г. включена тема «Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения». Здесь имеются в виду и замена стальных конструкций на алюминиевые в железнодорожных и автомобильных транспортных системах, в том числе создание пассажирских и грузовых вагонов, цистерн большой емкости, имеющих малую массу, создающих меньшую нагрузку на транспортные коммуникации и требующие меньшей энергии для перемещения грузов.

Листовые полуфабрикаты из алюминиевых сплавов изготавливаются, в основном, методом плоской прокатки. Это предопределяет необходимость изучения механизмов формирования свойств алюминиевого проката в современном производстве, разработке мероприятий по повышению его эффективности с целью выпуска продукции надлежащего качества.

В связи с этим, исследования, направленные на изучение реологии алюминиевых сплавов и на совершенствование режимов их обработки следует **считать актуальными.**

Работа выполнена в рамках исследований, включенных в следующие научные программы и контракты:

- «Апробация идей и модернизация процессов обработки материалов давлением, в том числе аддитивных технологий, с целью повышения эффективности производства, качества и эксплуатационной надежности металлургической продукции ответственного назначения» в рамках базовой части государственного задания высшим учебным заведениям и научным организациям в сфере научной деятельности № 11.9538.2017/БЧ от 01.02.2017 г.
- «Разработка научных основ физики и механики обработки металлов давлением с целью создания энерго- и ресурсосберегающих инновационных технологий производства металлургической продукции ответственного назначения» (гос. задание № 11.13692014/К от 18.07.2014);
- НИР №02/762 «Изучение влияния температурно-скоростных параметров деформации при горячей прокатке плит из сплава АК4-

1ч на механические свойства», в рамках плана мероприятий ОАО КУМЗ на 2016г., утвержденного управляющим директором предприятия.

- НИР №75/226 «Оптимизация технологии изготовления плит из сплава В-1461», в рамках плана мероприятий ОАО КУМЗ на 2016г., утвержденного управляющим директором предприятия.

**Степень разработанности темы.** При получении требуемых механических свойств готового изделия из алюминиевых сплавов необходимо учитывать эффект структурного упрочнения, заключающийся в том, что в определенных условиях деформации, несмотря на высокую температуру нагрева заготовки, динамическая рекристаллизация материала не наступает. Это позволяет сохранить возможное упрочненное при деформации состояние металла в готовом изделии. Ю.М. Вайнблатом с сотрудниками ВИЛС была изложена точка зрения на происходящие в алюминиевых сплавах процессы, заключающиеся в варьировании температурно-скоростных условий деформации с целью получения необходимого структурного состояния после прокатки и термообработки.

**Целью** работы является описание влияния режимов горячей прокатки алюминиевых сплавов на механические свойства полученного продукта.

Для достижения данной цели сформулированы **следующие задачи**:

- разработать методику, использующую применение мониторинговых устройств, непосредственно вмонтированных в состав прокатного агрегата;
- с помощью этой методики оценить изменение прочностных свойств, в том числе сопротивления деформации в проходах горячей прокатки;
- оценить вклад параметров горячей прокатки в формирование свойств алюминиевых сплавов, в том числе с учетом эффекта анизотропии.

**Научная новизна работы** заключается в получении новых данных о реологических свойствах алюминиевых сплавов, которые фиксируются мониторинговыми системами непосредственно во время прохождения производственного процесса прокатки.

**Теоретическая значимость** работы заключается в разработке методики оценки сопротивления деформации на основе обработки данных о загрузке стана горячей прокатки и по проходам с учетом времени пауз. Для оценки прохождения процессов статической и динамической рекристаллизации предложено применить булеву алгебру.

**Практическая значимость** работы состоит в формулировке рекомендаций по рационализации процессов листовой прокатки алюминиевых сплавов.

**Методология исследования** построена на основных концепциях механики деформируемого тела, в том числе на применении основных гипотез (изотропности, несжимаемости и др.) и соответствующего математического

аппарата. В экспериментальной части использованы методы рентгеноструктурного анализа, растровой электронной микроскопии с использованием ориентационной микроскопии, основанной на анализе дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD), а также инструментальные методы измерения механических свойств.

**Методы исследования** включают:

- оценку динамического и статического моментов загрузки стана горячей прокатки;
- расчет сопротивления деформации по показаниям мониторинговой системы прокатного стана;
- определение физико-механических свойств готового проката;
- изменение скоростного режима прокатки и оценка его влияния на уровень физико-механических свойств.

**Положения, выносимые на защиту:**

- Для формализации процесса горячей прокатки предлагается воспользоваться аппаратом булевой алгебры, с применением приемов математического планирования.
- Предложено с помощью мониторинговой системы прокатного стана определять сопротивление деформации в каждом проходе горячей прокатки.
- Исследовано влияние скорости деформации в проходах горячей прокатки на формирование свойств алюминиевых сплавов с учетом эффекта анизотропии.
- Определены рамки значений фактора формы очага деформации, позволяющие получить наиболее высокий уровень механических свойств готового изделия для сплавов АК4-1ч и 2024.

**Степень достоверности результатов работы** подтверждена статистической обработкой полученных данных, сравнением с известными аналогами из технической литературы.

**Апробация результатов работы** выполнена путем докладов итогов исследований на конференциях и публикацией в рецензируемых изданиях, в том числе зарубежных и из перечня ВАК.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: V международная интерактивная научно-практическая конференция «Инновации в материаловедении и металлургии», УрФУ, Екатеринбург. 2015; II международная научно-практическая конференция «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства», МГТУ им. Г.И. Носова. Магнитогорск. 2016; XVII международная научно-техническая конференция «Уральская школа-семинар металловедов – молодых ученых», УрФУ, Екатеринбург. 2016. XVIII международная научно-техническая

конференция «Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых», УрФУ, Екатеринбург. 2017.

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 12-ти печатных трудах, в том числе 5 из них опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Две статьи вошли в международную базу Scopus.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цели и задачи, показана теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой главе** представлен обзор литературных данных, описывающих механизмы формирования механических характеристик в процессе горячей прокатки алюминиевых сплавов. Кроме того, представлены методы расчета энергосиловых параметров при плоской прокатке.

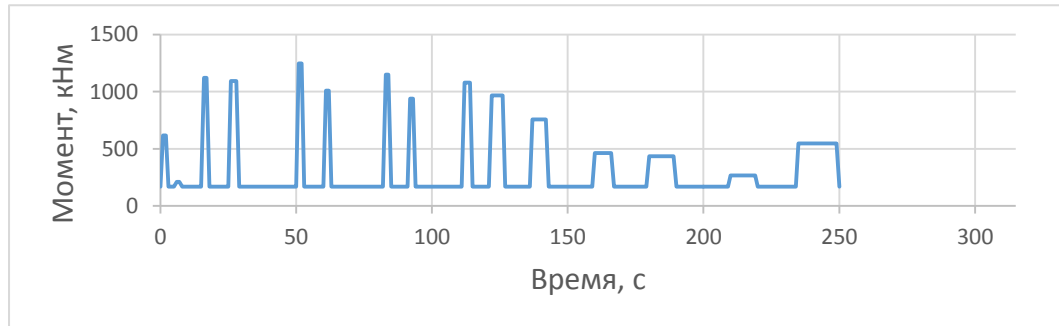
**Вторая глава** посвящена изучению параметров процесса горячей прокатки алюминиевых сплавов с учетом нестационарности процесса. Осуществлена расшифровка и обработка данных системы мониторинга стана горячей прокатки. Приведено влияние темпа горячей слябовой прокатки алюминиевого сплава на нагрузку привода. С помощью аппарата булевой алгебры сформулирована модель описания деформации алюминиевых сплавов при их горячей прокатке с учетом нестационарности процесса.

Получены значения динамического момента при прокатке 3-х различных типоразмеров продукции. Разница  $\Delta$  между пиковой нагрузкой привода во время заправки полосы в валки и нагрузкой во время установившегося процесса прокатки, составила 168 кНм. При прокате других слябовых заготовок данная величина сохраняет свое значение. Следовательно, вычитая данную разницу из суммарного момента прокатки, из которого невозможно вычленить отдельные составляющие момента (в начальных проходах слябовой горячей прокатки, в которых длина заготовки мала), можно получить тем самым статический момент в каждом проходе.

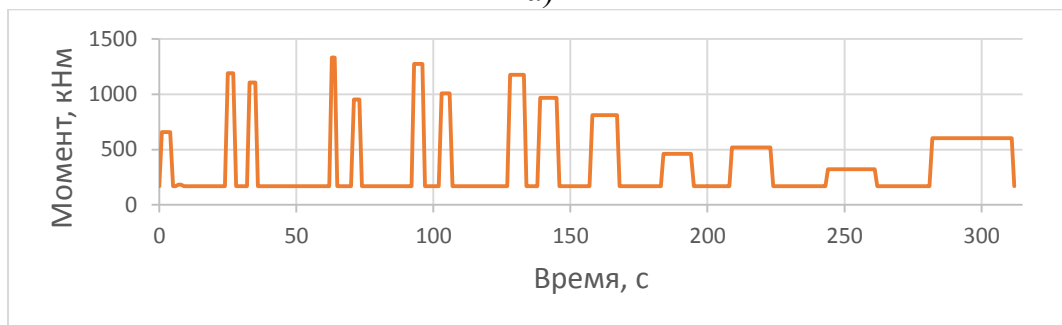
На основании этого, в ходе исследования получены диаграммы нагрузки привода в процессе прокатки двух заготовок из сплава 6061 одного типоразмера, прокатанных по разным режимам: обычный скоростной режим и замедленный режим (линейная скорость рабочих валков составляла не более 0,5 м/с). Усилия прокатки измеряли по проходам мониторинговой системой прокатного стана. Сляб из алюминиевого сплава 6061 толщиной 445 мм, шириной 1340 мм, длиной 1500 мм прокатывали в рабочих валках диаметром 933 мм до конечной толщины 23,6 мм.

Прокатку вели по двум схемам: при цикле прокатки 250 с (обычный режим) и 312 с (замедленный режим), увеличение цикла составило 25%. Для достижения большего цикла прокатки искусственно занижали скорость вращения валков.

Для качественного сравнения протяженности машинного времени и времени пауз приведены две диаграммы на рисунке 1. Соотношение временных интервалов на каждой из диаграмм выдержано количественно. Пиковые величины характеризуют максимальный момент в проходе.



а)



б)

Рисунок 1 - Сравнение протяженности временных отрезков в процессе реверсивной прокатки: машинное время – пики на графике, время пауз – впадины, а – обычный режим, б – замедленный режим

В ходе прокатки выявлено, что температура прокатки по ходу процесса обычной прокатки изменялась от 460 до 423 °С, а при замедленном варианте от 460 до 376 °С, т.е. полоса остыла на 47° С больше.

Также определено, что разность усилий, полученных в обоих случаях прокатки, является величиной положительной, т.е. при замедленной прокатке усилие оказывается во всех случаях выше (рисунок 2). Разность возрастает в начале и в конце маршрута прокатки. Усреднение величин возрастания усилия приводит к значению 5 %.

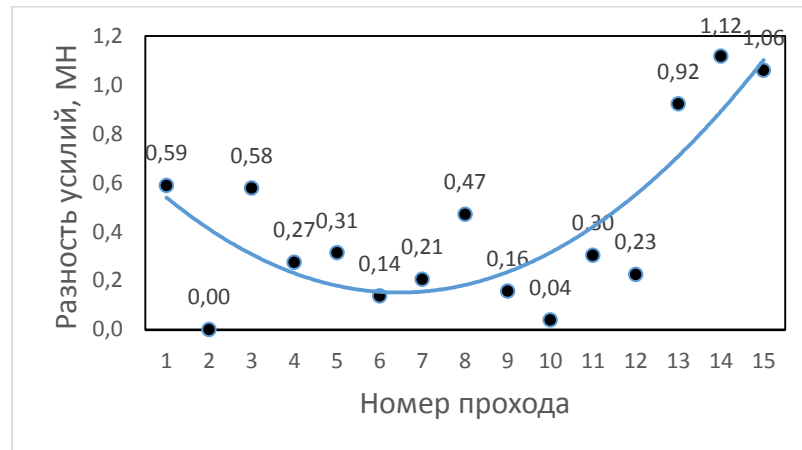


Рисунок 2 - Разность усилий при замедленной и обычной прокатке: точки – опытные данные, линия – полиномиальная регрессия второго порядка с коэффициентом корреляции  $R^2 = 0,64$

В начале прокатки разница в температурах заготовки минимальна, поскольку заготовка в обоих случаях нагревалась до одной и той же температуры. Таким образом, влияние температуры на различие энергосиловых параметров для этой стадии процесса прокатки минимально. Поэтому предположили, что в этом случае играет роль эффект структурного упрочнения: при снижении скорости деформации тормозятся процессы рекристаллизации, металл проявляет более высокий уровень прочностных свойств, что нашло отражение в исследовании.

Следующим по значимости вопросом является получение продукции с более высокими механическими характеристиками.

Испытания образцов на растяжение показали, что прокатка с пониженными скоростями привела к возрастанию временного сопротивления, измеренного вдоль оси прокатки, от 144 МПа до 157 МПа (повышение на 9%), условного предела текучести с 83 до 101 МПа (повышение на 22 %). Относительное удлинение уменьшилось незначительно: с 26 до 25 %.

На рисунке 3 представлены поперечные макрошлифы горячекатаных плит с изображенной на них макроструктурой.



а)





б)

Рисунок 3 - Макроструктура поперечных макрошлифов, отобранных от горячекатаных плит, прокатанных при обычном (а) и замедленном (б) режимах, LT – поперечное направление, ST – направление по толщине плиты

При прокатке в обычном скоростном режиме (рисунок 3а) наблюдается существенная разноструктурность по толщине плиты – приповерхностный слой в объеме 22% от суммарной толщины плиты (направление ST на рисунке 3) имеет вытянутые рекристаллизованные зерна вдоль направления прокатки, что является результатом неравномерного распределения скоростей деформации в приповерхностных слоях на начальной стадии прокатки. При контролируемой скорости прокатки (рисунок 3б) скорость деформации в приповерхностных слоях на порядок меньше скорости деформации при обычном режиме прокатки, что в свою очередь не позволяет начаться динамической рекристаллизации металла.

Однако после нагрева горячекатаных образцов в лабораторной печи и закалке в воде, ситуация с разноструктурностью по толщине плит оказалось обратной по сравнению с горячекатаными плитами: плита, прокатанная по замедленному режиму, имела гораздо больший объем рекристаллизованных зерен в приповерхностном слое (порядка 30 %) по сравнению с плитой, прокатанной по обычному скоростному режиму. При прокатке заготовки в замедленном режиме получено нерекристаллизованное структурное состояние плиты после окончания прокатки, однако это привело к последующей рекристаллизации приповерхностных слоев в процессе нагрева под закалку.

Вследствие цикличности процесса прокатки, с целью упрощения алгоритмизации расчетов сопротивления деформации и энергосиловых параметров горячей прокатки, предложено воспользоваться аппаратом булевой алгебры.

Для формализации описания состояния металла в каждом отдельном проходе использован метод планирования двухфакторного эксперимента. Его матрица предполагает изменение параметра на двух уровнях: верхнем (знак «+») и нижнем (знак «-»). При положительном знаке событие происходит, а при отрицательном – нет. С позиции изменения структуры рассматриваются два события: наличие динамической кристаллизации в проходе и наличие статической кристаллизации в паузе. Если происходит хотя бы одно событие, то конечный результат окажется со знаком «+», т.е. заготовка оказывается

рекристаллизована. В полном плане двухфакторного эксперимента перебор всех возможных сочетаний дает четыре результата для одного прохода прокатки.

Использование булевой алгебры позволяет осуществлять математические действия с переменными, поэтому заменим знак «+» на единицу, а знак «-» на ноль при сохранении описанного выше смысла переменных. Введем логические аргументы  $d_i$  и  $s_i$ , равные нулю при отсутствии события и равные единице при его наличии. Результат  $q_i = d_i + s_i$  получен путем логического сложения (логическое «или» - дизъюнкция).

Следует отметить, что для многопроходных процессов горячей деформации принцип накопления деформации применяется в нескольких смыслах. Один из них, наряду с вытяжкой, основан на понятии «укова» из кузнечно-штамповочного производства. Смысл заключается в том, чтобы была возможность аддитивности деформаций по переходам независимо от того, рекристаллизуется ли металл от прохода к проходу. Это позволяет понять, насколько велика степень проработки структуры металла. В другом случае степень деформации рассчитывается с целью определения интенсивности упрочнения металла, и такой расчет делается с учетом возможного разупрочнения.

Обозначим степени деформации, рассчитываемые по формуле 1, по номерам проходов прокатки как  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots$ , а накопленные после данного прохода степени деформации  $\varepsilon_{\Sigma 1}, \varepsilon_{\Sigma 2}, \varepsilon_{\Sigma 3}$  и т.д.

$$\varepsilon = \ln(h_0/h_1). \quad (1)$$

Очевидно, что для первого прохода  $\varepsilon_{\Sigma 1} = \varepsilon_1$ . Для второго прохода  $\varepsilon_{\Sigma 2} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$  при условии  $q_1 = d_1 + s_1 = 0$  и  $\varepsilon_{\Sigma 2} = \varepsilon_2$  при условии  $q_i = d_i + s_i = 1$ . Обобщенное представление накопленной степени деформации по переходам будет выглядеть как

$$\varepsilon_{\Sigma i} = \varepsilon_{\Sigma i-1}(-q_i) + \varepsilon_i. \quad (2)$$

Здесь  $(-q_i)$  представляет собой операцию логического отрицания: если  $q_i = 0$ , то  $(-q_i) = 1$  и наоборот.

Степень деформации, характеризующая уков, т.е. проработку исходной структуры, будет рассчитываться по следующей формуле

$$\varepsilon_{\Sigma y i} = \varepsilon_{\Sigma i-1} + \varepsilon_i. \quad (3)$$

В данном случае применения логических операторов не требуется, поэтому результат является сложением частных значений степеней деформации

С использованием вышеописанной методики формализована процедура определения сопротивления деформации и связанных с ним энергосиловых расчетов.

В **третьей** главе разработана методика изучения скоростного упрочнения алюминиевых сплавов при горячей прокатке на примере плит толщиной 23,6 мм из сплава 6061, прокатанных с различными скоростными режимами. Описано влияние параметров скоростного упрочнения при прокатке

алюминиевых сплавов на анизотропию свойств. Произведен статистический анализ показателей механических свойств горячекатаных листов и плит с учетом марочного состава и типоразмерного ряда.

В проходах прокатки постоянно изменяется параметр формы очага деформации  $l/h_{cp}$ , здесь  $l$  и  $h_{cp}$  – длина очага деформации и средняя толщина проката соответственно. В промышленном эксперименте, при прокатке заготовки из сплава 6061, описанной во второй главе, этот параметр изменялся по закономерности, отраженной на рисунке 4.

Показатель  $l/h_{cp}$  при прокатке составляет 0,13...1,79 (рисунок 4), т.е. очаг деформации в начале процесса характеризуется как высокий с постепенным уменьшением высоты, что заставляет применять различные методики расчета коэффициента напряженного состояния.

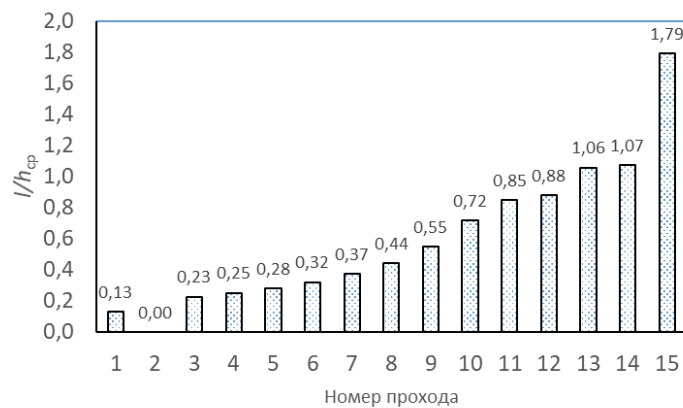


Рисунок 4 – Изменение параметра формы очага деформации по проходам

Следует отметить, что в исследованном маршруте предельное значение  $l/h_{cp} = 2$  не превышено. Переход к прокатке при  $l/h_{cp} > 2$  (низкий очаг деформации) приводит к необходимости использования другой формулы для подсчета коэффициента напряженного состояния, учитывающей коэффициент трения. Это создает дополнительную неточность в выполнении дальнейших расчетов, поскольку коэффициент трения – величина, слишком приближенно определяемая в промышленных условиях, например, она зависит от качества и срока работы эмульсии и износа рабочей поверхности валков.

Далее, с помощью известных формул теории продольной прокатки, на основании полученных фактических значений усилия прокатки, предложено оценивать величину сопротивления деформации в каждом проходе по формуле:

$$\sigma_{срi} = \frac{P_i}{l_i} \cdot \frac{B_i}{1,15} \cdot n_{\sigma i}, \quad (4)$$

где  $P_i$  – усилие прокатки,  $l_i$  – длина очага деформации,  $B_i$  – ширина проката в конкретном проходе,  $n_{\sigma i}$  – коэффициент напряженного состояния.

Посредством показаний мониторинговой системы прокатного стана измерено усилие  $P_i$  в каждом проходе. Величина  $P_i$  в проходе не является константой, как это часто принимают в расчетах. На нее оказывает влияние скорость обработки, равномерность распределения температуры и другие факторы.

На рисунке 5 приведены результаты измерения усилия в проходе №10 при обычном режиме прокатки, при обжатии полосы по толщине от 150 мм до 110 мм при фиксированной датчиком температуре 440 °С. Аргументом является номер измерения, которое производилось каждые 105-110 мс.

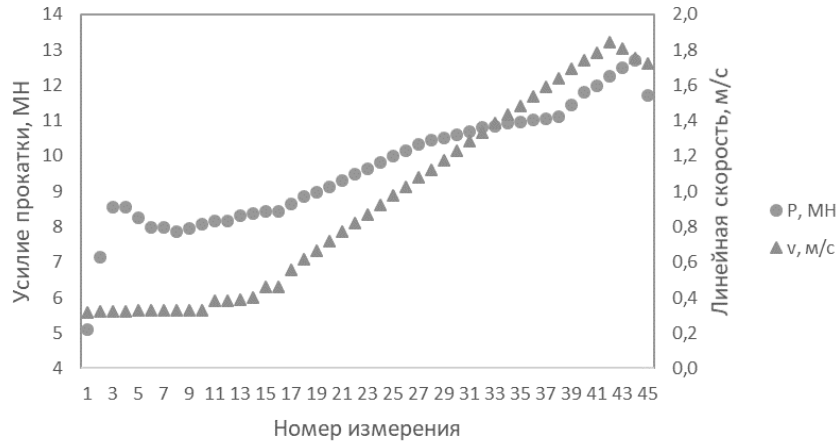


Рисунок 5 – Изменение усилия прокатки  $P_i$  в течение времени прохода №10 при обычном режиме прокатки и соответствующее изменение линейной скорости вращения валков  $v$

Анализ графика показывает, что повышение усилия прокатки коррелирует с увеличением скорости вращения валков. Коэффициент линейной корреляции между этими двумя параметрами оказался равен 0,949, что говорит о тесной математической связи. Повышение усилия при увеличении скорости прокатки может быть связано только с влиянием вязкости прокатываемого металла. Вязкие свойства в теории пластичности оцениваются с помощью введения параметра средней по очагу скорости деформации  $\sigma_{spi}$ , ее рассчитывали по формуле Тринкса

$$\xi_{spi} = \frac{v_i * \Delta h_i}{h_{oi} l_i}, \quad (5)$$

В результате расчетов по формулам (4) и (5) получены графики (рисунок 6), иллюстрирующие изменение сопротивления и скорости деформации в проходе № 10.

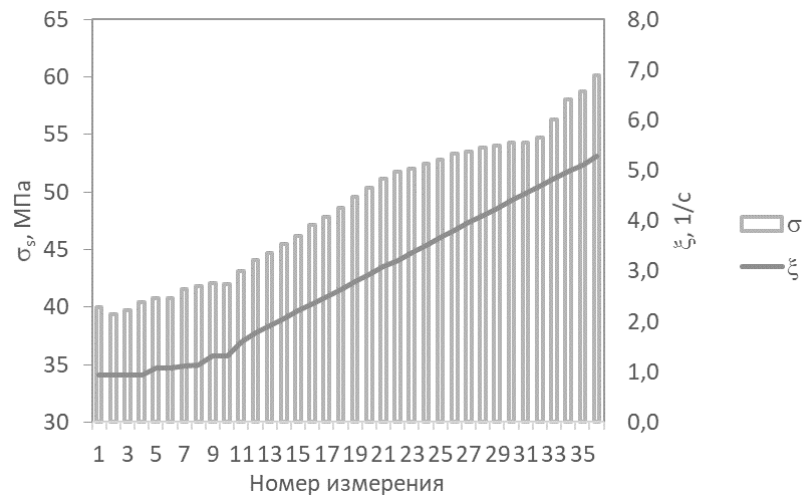


Рисунок 6 – Изменение сопротивления деформации (столбцы) и скорости деформации (линия) в течение прохода №10 при обычном режиме прокатки

Здесь выявлен диапазон изменения сопротивления деформации в одном проходе прокатки: от 40 МПа до 60 МПа (приращение на 50%) при изменении скорости деформации от 1 до 6 с<sup>-1</sup> (увеличение в шесть раз). Аналогичные диаграммы были построены для всех проходов прокатки.

Для наглядности в таблице 1 приводятся уравнения регрессии, описывающие полученные семейства экспериментальных точек в нескольких проходах. Так, в проходе № 8 происходит обжатие полосы от 230 мм до 190 мм, в проходе № 10 - от 150 до 110 мм и в проходе № 11 от 110 мм до 80 мм.

Таблица 1 - Сравнение характеристик упрочнения материала по проходам

Номер прохода	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Относительное обжатие, %	Температура, °С
8	$\sigma_s = 24,985 + 8,0318\xi$	0,9620	17	447
10	$\sigma_s = 36,574 + 4,2854 \xi$	0,9822	27	443
12	$\sigma_s = 47,455 + 2,5296 \xi$	0,9558	27	441

Приведенные выше данные свидетельствуют об упрочнении сплава 6061 при осуществлении каждого следующего прохода с затуханием этого явления к концу прокатки. Обнаруженный эффект не может быть выявлен в лабораторных условиях, поскольку в последнем случае создаются иные условия для измерений, отличные от производственных.

Параметры функции  $\sigma_s = f(\xi)$  были определены для всех проходов прокатки. Однако было выявлено, что достоверностью обладают данные только для середины маршрута, что поясняется графиком величины коэффициента корреляции  $R^2$  (рисунок 7).

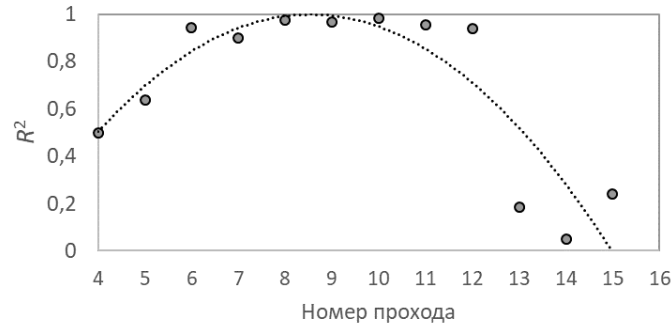


Рисунок 7 – Изменение по проходам прокатки величины достоверности аппроксимации при обычном режиме прокатки

Для проходов 6...12 (при отношении длины очага деформации к средней высоте в диапазоне 0,32...0,88) величина достоверности аппроксимации приближается к единице, что говорит о тесной корреляционной связи, а в первых и последних проходах прокатки корреляция нарушается. В первых проходах может сказываться эффект неравномерного распределения скоростей деформации и структурного упрочнения сплава 6061, который проявляется именно при низких скоростях и малых деформациях. В последних проходах становится ощутимо неравномерное охлаждение длинной и термически тонкой полосы на рольгангах, а также различное время паузы для конца полосы, находящегося постоянно вблизи валков и удаленного от валков конца полосы

Полученные данные о сопротивлении деформации при прокатке заготовки из сплава 6061 коррелируют с результатами, изложенными в известной литературе и предоставляет возможность оценивать  $\sigma_s$  по величине усилия прокатки, измеряемого мониторинговой системой прокатного стана.

Аналогичный расчет был осуществлен для плиты из сплава 7475. Горячая прокатка заготовки размерами 380x1317x2025 мм осуществлялась до толщины  $h_1=39$  мм продольно-поперечным способом с раскаткой на ширину 1370 мм. Описанные уравнения регрессии при прокатке плиты из сплава 7475 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение характеристик упрочнения материала по проходам  $i$  ( $R^2$  – коэффициент корреляции;  $\psi$  – относительное обжатие)

$i$	Уравнение регрессии	$R^2$	$\psi$ , %	$t$ , °C
1	$\sigma_s=58,609+48,569\xi$	0,9685	2,63	396
3	$\sigma_s=53,398+36,523\xi$	0,7919	5,41	397
5	$\sigma_s=44,654+49,403\xi$	0,8137	12,86	402
6	$\sigma_s=65,501+4,4795\xi$	0,8618	14,75	407
7	$\sigma_s=62,789+7,1136\xi$	0,7732	17,31	415
8	$\sigma_s=69,478+3,127\xi$	0,9614	20,93	420
9	$\sigma_s=65,857+2,8647\xi$	0,9705	26,47	424
10	$\sigma_s=66,316+1,9443\xi$	0,9029	32,00	433
11	$\sigma_s=67,391+1,921\xi$	0,9184	29,41	439
12	$\sigma_s=72,939+1,7511\xi$	0,9395	34,17	441

Анализ данных таблицы 2 показывает, что при таком представлении информации уровень достоверности оказывается высоким. Первое слагаемое в уравнениях характеризует уровень упрочнения материала в каждом из проходов. Видно, что это слагаемое возрастает от значения 44 МПа в проходе №5 до значения 72 МПа в проходе №12, т.е. происходит упрочнение материала на 63 %, что свидетельствует о том, что заготовка не разупрочняется между проходами и остается нерекристаллизованной.

Далее в работе приведены исследования механических свойств образцов, отобранных от плит из сплава 6061, прокатанных по двум скоростным режимам в процессе горячей прокатки. Полученные результаты представлены в виде графиков, приведенных на рисунках 8, 9.

На них горизонтальная ось соответствует направлению прокатки НП, ортогональная ось – поперечному направлению ПН, значения между этими осями соответствуют направлению под  $45^\circ$  по отношению к оси прокатки.

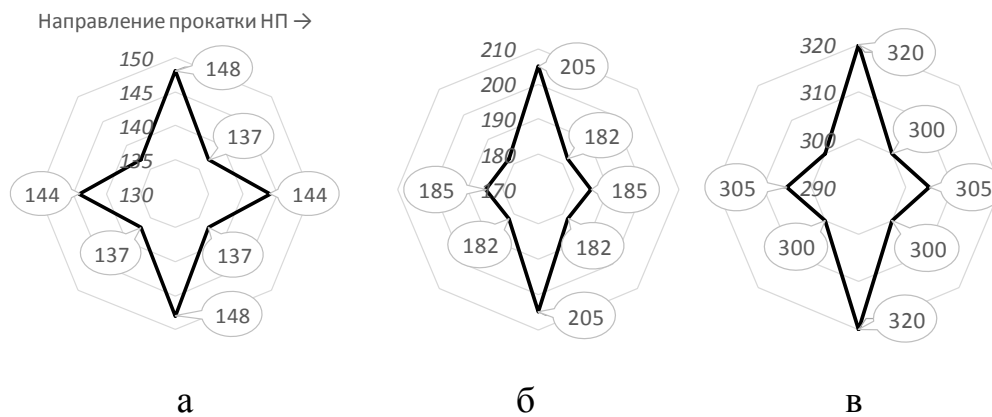


Рисунок 8 – Изменение временного сопротивления (МПа) в зависимости от угла вырезки образцов: после горячей прокатки (а), после проведения закалки (б), после проведения искусственного старения (в)

Временное сопротивление  $\sigma_v$  сплава 6061 в состоянии после прокатки может изменяться в пределах 137...148 МПа, при угле отбора образцов  $45^\circ$  временное сопротивление оказывается на 5% ниже, чем в направлении прокатки и на 8 % меньше по отношению к поперечному направлению. Разница между  $\sigma_v$  в продольном и поперечном направлениях составляет 3%, т.е. она наименьшая.

После проведения закалки прочность металла увеличилась - в направлении поперек прокатки со 148 до 205 МПа, т.е. на 38 %. При этом металл стал менее изотропен, разница между  $\sigma_v$  продольного и поперечного направления оказалась равна 11%. Наименьшие значения достигнуты для направления  $45^\circ$  относительно направления прокатки.

После старения произошло существенное повышение прочности, временное сопротивление повысилось со 185 до 305 МПа для продольного направления, т.е. на 65 %. При этом в поперечном направлении повышение составило только 56 %. Наименьшие значения предел текучести приобретает

под углом  $45^\circ$  и они меньше на 2%, чем та же величина в направлении прокатки. Относительное удлинение до разрыва  $\delta$  с точностью до одного процента оказалось равным 26 % во всех направлениях для горячекатаного состояния, т.е. с позиции пластических свойств металл оказался практически изотропен.

После старения произошло снижение пластических свойств по отношению к закаленному состоянию относительное удлинение уменьшилось с 40 до 16 % вдоль направления прокатки. При этом наиболее высокий уровень пластичности оказался достигнут для угла  $45^\circ$  по отношению к направлению прокатки. Он выше в 1,46 раза, чем в направлении поперек оси прокатки.

Во второй серии опытов прокатку вели в замедленном режиме, что достигалось снижением скорости прокатки, время пауз при этом старались не изменять.

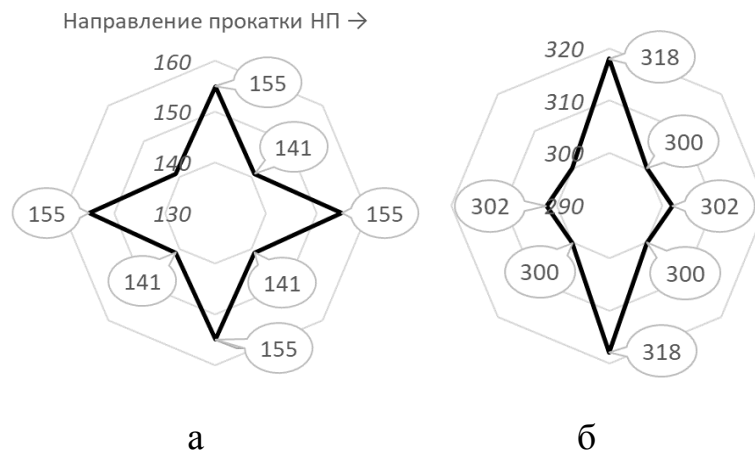


Рисунок 9 - Изменение временного сопротивления (МПа) в зависимости от угла вырезки образцов: после горячей прокатки (а) и после проведения искусственного старения (б)

В направлении прокатки  $\sigma_b$  увеличилось со 144 МПа до 155 МПа, т.е. на 8%, а в направлении ПН со 148 МПа до 155 МПа, т.е. на 5 %. Это можно объяснить более высокой степенью захлаживания проката из-за большего времени нахождения на рольгангах. Тем самым уменьшена интенсивность прохождения процессов рекристаллизации и/или возврата, металл частично может находиться в нагартованном состоянии.

После старения достигнут уровень  $\sigma_b = 318$  МПа в поперечном направлении, что практически равно уровню  $\sigma_b = 320$  МПа для обычного режима прокатки. В продольном направлении получено соответственно 302 и 305 МПа, что можно считать практически одинаковыми величинами. Таким образом, эффект закалки сгладил различия в значениях временного сопротивления в двух вариантах прокатки.

Металлографический анализ горячекатаных образцов из сплава 6061, показал, что структура преимущественно состояла из длинных (размер в НП превышал 600 мк) деформированных зерен. Внутренние области зерен характеризовались развитой мезоструктурой, т.е. состояли из большого



количества кристаллитов, имеющих близкие ориентировки, разделенных преимущественно малоугловыми границами.

На рисунке 10 представлен подробный структурный и текстурный анализ плиты из сплава 6061 после горячей прокатки по обычному (А) и замедленному (В) скоростному режиму соответственно, где а – макроструктура плиты; b, e – ориентационная карта (EBSD); c, g – функция ориентационного распределения (ODF), d – стереографический треугольник; f – область ODF для направления 45°.

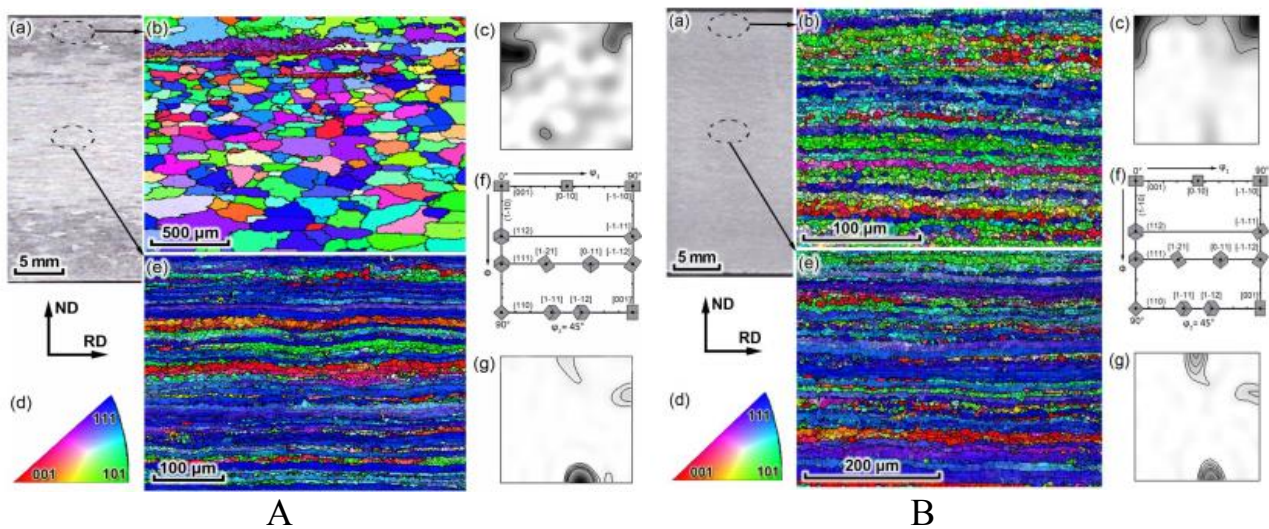


Рисунок 10 – Структурный и текстурный анализ горячекатаной плиты из сплава 6061, прокатанный по обычному скоростному режиму (А) и по замедленному режиму (В)

Ориентационный анализ образцов показал, что вне зависимости от режима ГП, наблюдалась выраженная ограниченная текстура. Основными компонентами текстуры являлись ориентировки: две из  $\{110\}\langle 112\rangle$ , две из  $\{112\}\langle 111\rangle$ , а также  $(001)[010]$  и  $(110)[001]$ . Данный набор дискретных ориентировок, за исключением  $(001)[010]$ , соответствовал текстуре холодной прокатки для материалов с ГЦК-решеткой.

Анализ факторов Тейлора для текстур образцов с механическими свойствами, позволяют утверждать, что анизотропия прочности в основном объясняется сформированным в результате горячей прокатки текстурным состоянием образцов.

Далее, с целью определения влияющих параметров на конечные механические свойства листов и плит, произведен статистический анализ технологической цепочки получения готового изделия из сплавов АК4-1ч и 2024. Статистические расчеты для данных сплавов выполняли с применением пакета АНАЛИЗ ДАННЫХ в электронных таблицах EXCEL.

Полученные при измерениях данные ранжировали по толщине проката. Для выборки характерен повышенный рассев данных, о чем говорит невысокая величина коэффициента достоверности аппроксимации (на уровне 0,4).

На рисунке 11 представлена зависимость условного предела текучести от показателя  $l/h_{cp}$  с разделенными областями А, В, С, D.

Область D (область толстых плит, толщинами 70-80 мм) характеризуется смещением результатов измерений вниз при сохранении высоких значений. Область C (плиты толщинами 25-79 мм) характеризуется умеренным рассеянием результатов измерений при относительно высоких значениях. Область B (плиты толщинами 8-24 мм) имеет наиболее приемлемый, с позиции квалиметрии, рассев значений. Область A (листы толщиной менее 8 мм) имеют наихудшие показатели механических свойств для всего типоразмерного ряда продукции.

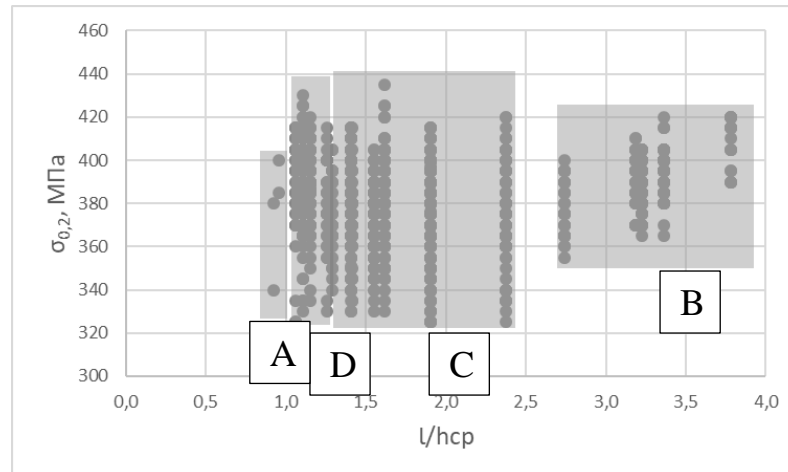


Рисунок 11 – Зависимость условного предела текучести от  $l/h_{ср}$

Весь маршрут прокатки плитной заготовки из толстого слитка сводится к одной тенденции – постепенным увеличением показателя  $l/h_{ср}$ . Следовательно, при одинаковой технологии производства плит (а, следовательно, при одинаковом маршруте горячей прокатки) из сплава АК4-1ч, значимую роль играет значение показателя  $l/h_{ср}$  в последних проходах.

Для описания принципа формирования механических свойств при прокатке листов и плит из сплава АК4-1ч необходимо разделить на следующие области:  $l/h_{ср} < 1,0$ ;  $l/h_{ср} = 1,0 \div 1,2$ ;  $l/h_{ср} = 1,3 \div 2,4$ ;  $l/h_{ср} = 2,5 \div 4,0$ .

Аналогично сплаву АК4-1ч, представлены статистические данные механических характеристик плит из сплава 2024.

Наименьшим уровнем прочностных свойств обладают тонкие полосы (менее 20 мм) и толстые плиты (более 50 мм). Пониженные прочностные свойства для тонких полос обусловлены более интенсивным протеканием процесса разупрочнения при горячей прокатке. Для толстых полос пониженные прочностные свойства обусловлены невозможностью качественной проработки структуры в процессе горячей прокатки. Максимальными прочностными характеристиками обладают тонкие полосы толщиной менее 20 мм, что свидетельствует о более полном протекании процесса разупрочнения при горячей прокатке тонких полос.

Механические свойства листов и плит для листов и плит из сплава 2024 можно разделить по конфигурации очага деформации на следующие области:  $l/h_{ср} < 1,3$ ;  $l/h_{ср} = 1,3 \div 1,6$ ;  $l/h_{ср} = 1,7 \div 3,0$ ;  $l/h_{ср} = 3,1 \div 5,6$ .

Наиболее высокими механическими характеристиками, а также их наименьшим рассевом, обладает область В, находящаяся в диапазоне  $l/h_{cp} = 2,0 \div 3,1$ . При этом наибольшие трудности возникают при достижении прочностных показателей у толстых плит толщиной свыше 51 мм, для которых, с целью более лучшей проработки структуры, необходимо использовать большие абсолютные обжатия за проход. Наиболее высокими механическими характеристиками обладают листы и плиты толщиной от 8,0 до 16 мм, что связано с более значительной проработкой структуры.

В четвертой главе представлены результаты оптимизации технологических режимов производства плит из сплава 6061.

В качестве оптимизируемой технологии, была выбрана прокатка плиты, имеющей размеры 20x1800x3000 мм. Изготовление данной плиты осуществляется методом горячей прокатки из фрезерованной по широким граням заготовки, толщиной 580-590 мм, шириной 1630 мм, длиной от 4000 мм.

Действующий режим обжатий при горячей прокатке плиты из сплава АК4-1ч представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Действующий режим горячей прокатки плиты сечением 21,1x2000 мм из сплава 6061

№	Начальная толщина, мм	Конечная толщина, мм	Обжатие, мм	Температура, °С	Средняя скорость вращения валков, м/с	Фактор формы	Коэффициент напряженного состояния
	$h_0$	$h_1$	$\Delta h$	$t$	$v$	$l/h_{cp}$	$n_{\sigma}$
1	590	571	19	459	1,1	0,18	1,99
2	571	543	28	459	1,1	0,23	1,81
3	543	515	28	459	1,1	0,24	1,77
4	515	482	33	459	1,2	0,28	1,67
5	482	442	40	459	2,0	0,33	1,56
6	442	393	49	459	2,0	0,40	1,44
7	393	343	50	460	2,0	0,46	1,36
8	343	292	51	461	2,0	0,54	1,28
9	292	241	51	462	2,0	0,64	1,19
10	241	190	51	463	2,0	0,79	1,10
11	190	139	51	460	2,0	1,04	1,17
12	139	93	46	453	2,0	1,40	1,23
13	93	55	38	440	2,0	2,00	1,31
14	55	36,6	18,4	431	2,0	2,25	1,39
15	36,6	21,1	15,5	418	2,0	3,27	1,83

В качестве элементов новой технологии прокатки для сплава 6061 предлагается изменить режим обжатий следующим образом:

1. Перераспределить абсолютные обжатия с учетом показателя  $l/h_{cp}$  таким образом, чтобы снизить коэффициент напряженного состояния  $n_{\sigma}$  и тем самым, снизить удельные энергозатраты на выпуск соответствующей продукции;

2. С целью снижения неравномерности свойств по толщине готовой плиты, предложено ограничить линейную скорость вращения рабочих валков в пределах 0,3-0,6 м/с на толщинах свыше 150 мм;

3. Дополнительно получить повышение уровня механических свойств на  $1/2$  толщине изделия;

4. Снизить анизотропию свойств по толщине изделия.

В зависимости от значения  $l/h_{cp}$  коэффициент напряженного состояния  $n_{\sigma}$  рассчитывался по следующим формулам, представленным в таблице 4.

Таблица 4 – Формулы для расчета коэффициента напряженного состояния  $n_{\sigma}$  в зависимости от значения  $l/h_{cp}$

Значение $l/h_{cp}$	Формула для расчета $n_{\sigma}$
$>1,0$	$n_{\sigma} = \left( \frac{l}{h_{cp}} \right)^{-0,4}$
$1,0..2,0$	$n_{\sigma} = 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{l}{h_{cp}}$
$<2,0$	$n_{\sigma} = 2 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{H_H}{H_1} \cdot \left( \frac{H_H}{H_1}^{\delta} - 1 \right) \cdot \left( \frac{\varepsilon}{\delta - 1} \right)^{\frac{H_H}{H_1}}$

Здесь  $\varepsilon$  – степень деформации;  $H_H$  – нейтральная высота очага деформации, мм;  $H_1$  – конечная толщина полосы в проходе, мм;  $\delta = 2 \cdot \mu \cdot \frac{l}{\Delta H}$ .

Кроме всего прочего, при  $l/h_{cp} = 2 \div 5$  участки очага деформации, характеризующие постоянство касательных напряжений, могут отсутствовать, вследствие чего, зона прилипания очага деформации будет состоять только из одного участка заторможенной деформации, что может привести к дополнительным затратам энергии, которая будет тратиться на преодоление сил трения. Тем самым, целенаправленно снижая  $l/h_{cp}$  до значения  $l/h_{cp} = 1 \div 2$ , получаем снижение удельных энергозатрат непосредственно в каждом отдельном проходе.

В таблице 5 представлена рекомендуемая схема обжатий при прокатке плиты, сечением 21,1x2000 мм из сплава 6061 на стане горячей прокатки фирмы «DANIELI» в условиях ОАО «КУМЗ».

Здесь, в проходах №1 - №10 наблюдается высокий очаг деформации со значением  $l/h_{cp} \leq 1$ ; в проходах №11 - №14 наблюдается умеренный очаг деформации с  $l/h_{cp} = 1 \div 2$ ; в проходе №15 – низкий очаг деформации с  $l/h_{cp} = 2 \div 5$ .

Таблица 5 –Предложенная схема обжатий при прокатке плиты сечением 21,1x2000 мм

№	Начальная толщина, мм	Конечная толщина, мм	Обжатие, мм	Температура, °С	Средняя скорость вращения валков, м/с	Фактор формы	Коэффициент напряженного состояния
	$h_0$	$h_1$	$\Delta h$	$t$	$v$	$l/h_{cp}$	$n_\sigma$
1	590	563	27	459	0,5	0,22	1,85
2	563	536	27	458	0,5	0,23	1,81
3	536	509	27	456	0,5	0,24	1,77
4	509	482	27	455	0,5	0,25	1,74
5	482	427	55	454	0,5	0,39	1,46
6	427	372	55	452	0,5	0,45	1,38
7	372	317	55	450	0,5	0,52	1,30
8	317	262	55	448	0,5	0,61	1,22
9	262	207	55	445	0,5	0,76	1,12
10	207	153	54	441	0,5	0,98	1,16
11	153	98	55	442	1,5	1,42	1,24
12	98	57,3	40,7	444	2,0	1,97	1,33
13	57,3	41	16,3	438	2,0	1,97	1,33
14	41	32	9	427	2,0	1,97	1,33
15	32	21,1	10,9	411	2,0	2,98	1,66

Распределение работы прокатки по проходам для двух схем обжатий, а также среднего значения сопротивления деформации за проход представлено на рисунке 12 и 13 соответственно.

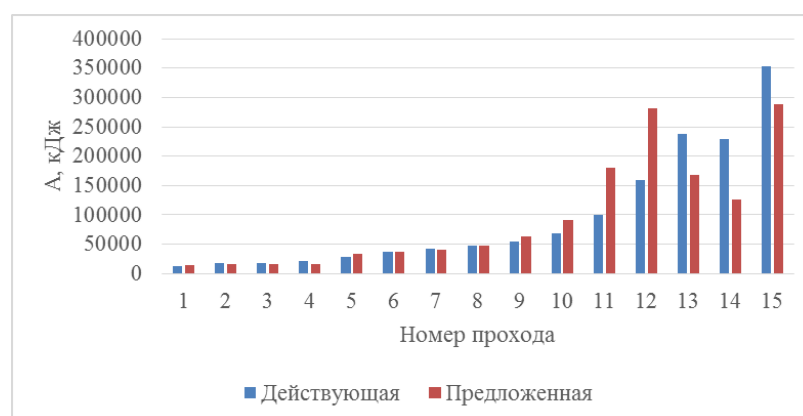


Рисунок 12 – Распределение работы прокатки по проходам для двух схем прокатки

Результаты расчетов показали, что применение предложенной схемы обжатий дает возможность снизить суммарные энергозатраты на получение плиты: суммарная работа (энергия) прокатки  $A_{np}$  снижается с 1427,6 до 1419,3 МДж. Суммарные затраты энергии на производство плиты из сплава 6061 по

предложенной схеме обжатию на 6,6 % ниже (или на 2,3 кВт/т) чем для аналогичной плиты, произведенной по действующей схеме обжатию.

В целом, при производстве плиты 21,1x2000 мм из сплава 6061 по предложенной схеме, увеличивается время этапа горячей прокатки в среднем на 100 с, или на 35 %.

Распределение среднего значения сопротивления деформации за проход для двух схем обжатию представлено на рисунке 13.

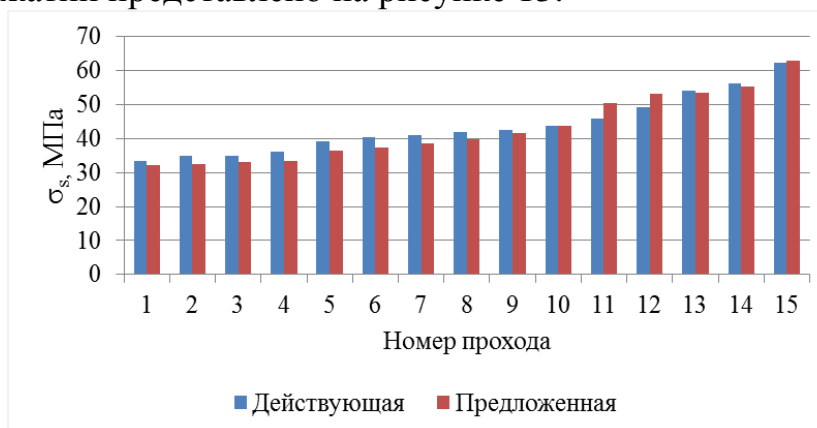


Рисунок 13 – Распределение сопротивления деформации по проходам

Как видно из рисунка 13, сопротивление деформации при прокатке плиты по действующей и предложенной схемам практически ничем не отличаются в конце маршрута деформирования.

Анализ дискретизации свойств в проходах прокатки и паузах для действующей и предложенной схем обжатию показал, что предложенная схема отличается на  $\Delta = - 0,6 \%$ , что в свою очередь не повлечет снижение прочностных свойств готового изделия

Ограничение линейной скорости вращения валков в каждом проходе позволяет достичь более высокий уровень свойств в центре плиты (на  $\frac{1}{2}$  толщины плиты), по сравнению с приповерхностной областью.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По итогам выполненного исследования можно заключить, что поставленные цели и задачи выполнены в полном объеме:

1. На основе теоретического исследования прокатки алюминиевых сплавов разработана методика, использующая применение мониторинговых устройств, непосредственно вмонтированных в состав прокатного агрегата для оценки сопротивления деформации в каждом проходе горячей прокатки.

2. Разработана методика на основе булевой алгебры, позволяющая облегчить алгоритмизацию расчетов сопротивления деформации и соответствующих расчетов энергосиловых параметров горячей прокатки для последующей оценки полноты прохождения процессов динамической и статической рекристаллизации. На основе экспериментальных исследований выявлено влияние темпа горячей прокатки алюминиевых сплавов формирование механических свойств непосредственно после горячей прокатки,

а также последующей термоадьюстажной обработки. Определено влияние скорости деформации в проходах горячей прокатки на формирование свойств алюминиевых сплавов с учетом эффекта анизотропии.

3. Получены конкретные уравнения регрессии, описывающие скоростное упрочнение сплавов 6061 и 7475, коррелирующие со справочными данными.

4. Проведено статистическое исследование выборки прокатанных плит из сплавов АК4-1ч, 2024, на основании которого выявлена зависимость временного сопротивления и условного предела текучести от фактора формы очага деформации. Определены рамки значений фактора формы очага деформации, позволяющие получить наиболее высокий уровень механических свойств готового изделия.

5. Разработана схема обжатий прокатки плиты размерами 21,1x2000 мм из сплава 6061, позволяющая добиться снижения уровня удельных затрат энергии на 6,6 % за счет снижения параметра  $l/h_{cp}$  в последних проходах. Благодаря ограничению скорости прокатки в начале и середине маршрута (при  $l/h_{cp} > 1$ ), возможно снизить неравномерность свойств по толщине изделия на уровне  $1/4 - 1/2$  толщины.

6. Разработанный режим прокатки сплава 6061 принят к использованию в действующем производстве на ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод».

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

*Публикации в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:*

1. Головнин М.А. Влияние темпа горячей слябовой прокатки алюминиевого сплава на нагрузку привода / Ю.Н. Логинов, **М.А. Головнин** // Производство проката. - 2016. - №10. - С. 8-11 (0,9 / 0,45 п.л.).

2. Головнин М.А. Модель описания деформации алюминиевых сплавов при их горячей прокатке с учетом рекристаллизационных процессов / Ю.Н. Логинов, М.Л. Лобанов, **М.А. Головнин** // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-прессовые, литейные и другие производства). - 2016. - №9. - С. 32-36 (0,8 / 0,26 п.л.).

3. Головнин М.А. Исследование влияния технологии производства плоского проката из сплава системы Al-Mg-Si на анизотропию свойств / Ю.Н. Логинов, **М.А. Головнин**, М.Л. Лобанов, Н.М. Дорошенко // Технология легких сплавов. - 2016. - №3. - С. 69-74 (1,15 / 0,28 п.л.).

4. Головнин М.А. Статистический анализ механических свойств плоского проката из алюминиевого сплава системы Al-Cu-Mg-Fe-Ni / Ю.Н. Логинов, **М.А. Головнин**, И.В. Снегирев // Технология легких сплавов. - 2017. - №1. - С. 29-34 (1,95 / 0,64 п.л.).

5. Головнин М.А. Влияние горячей прокатки на анизотропию механических свойств алюминиевого сплава 6061 / С.В. Данилов, П.Л. Резник, М.Л. Лобанов, **М.А. Головнин**, Ю.Н. Логинов // Вестник Южно-Уральского

государственного университета. Серия «Металлургия». - 2017. - Т. 17. - № 1. - С. 73-80 (0,58 / 0,12 п.л.).

6. Golovnin M.A. Technique of determining the parameters of rapid strengthening of an aluminum alloy during hot rolling / Y.N. Loginov, **M.A. Golovnin** // Russian metallurgy (Metally). - 2017. - Т. 2017. - № 3. - P. 188-192 (1,15 / 0,575 п.л.) (*индексирована в Scopus и Web of Science*).

7. Golovnin M.A. Influence of hot rolling technological regimes on 6061 aluminium alloy sheet texture / S.V. Danilov, I.A. Mustaeva, **M.A. Golovnin** // Solid State Phenomena. - 2017. - Т. 265. - P. 999-1004 (0,69 / 0,23 п.л.) (*индексирована в Scopus*).

### Публикации в других изданиях:

1. Головнин М.А. Разделение динамической и статической составляющих нагрузки при листовой прокатке алюминиевых сплавов / **М.А. Головнин** // Сборник материалов XVIII международной научно-технической уральской школы семинар металлургов – молодых ученых. – Екатеринбург: УрФУ, 2017 - С. 619-622 (0,23 / 0,23 п.л.)

2. Головнин М.А. Расшифровка показаний системы мониторинга горячей прокатки алюминиевого сплава / **М.А. Головнин**, И.В. Черноскутова // Сборник материалов XVI международной научно-технической уральской школы семинар металлургов – молодых ученых. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. - С. 50-53 (0,17 / 0,08 п.л.)

3. Головнин М.А. Оценка статистических характеристик прочности плоского проката из алюминиевого сплава АК4-1 / **М.А. Головнин** // Сборник материалов XVII международной научно-технической уральской школы семинар металлургов – молодых ученых. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. - С. 35-39 (0,28 / 0,28 п.л.)

4. Головнин М.А. Рационализация режимов обжарки при листовой прокатке заготовки из алюминиевого сплава / Ю.Н. Логинов, Р.Ф. Исхаков, **М.А. Головнин** // Сборник трудов XXI МНПК «ТРУБЫ-2014». – Челябинск: ОАО «РосНИТИ», НО «ФРТП», 2014. - С. 272-273 (0,23 / 0,07 п.л.)

5. Головнин М.А. Анизотропия горячекатаных листов из алюминиевого сплава 6061 / **М.А. Головнин**, Ю.Н. Логинов // Сборник трудов II Международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства». – Магнитогорск: ФГБОУ «МГТУ им. Г.И. Носова», 2016. - С. 43-44 (0,12 / 0,06 п.л.).

Подписано в печать \_\_\_\_\_ . Формат 60x84 1/16

Бумага 80 г/м<sup>2</sup>. Цифровая печать.

Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано в .....