

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ИВАНОВ Евгений Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАННЫХ
ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СТРУЖКОВЫХ ОТХОДОВ СПЛАВОВ
АЛЮМИНИЯ И ИЗУЧЕНИЕ ИХ СВОЙСТВ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
ЗАГИРОВ Николай Наильич

КРАСНОЯРСК – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	11
1.1 Классификация отходов алюминиевых сплавов и особенности их подготовки.....	11
1.2 Обзор существующих методов переработки стружковых отходов алюминиевых сплавов.....	13
1.3 Требования к исходному вторичному сырью, поступающему в переработку для получения из него полуфабрикатов и изделий.....	21
1.4 Общая характеристика свойств алюминиевых сплавов АД31 и АК12.....	25
1.5 Анализ технологии переработки сыпучих металлических отходов с использованием приемов порошковой металлургии и процессов обработки давлением.....	28
1.6 Выводы по главе.....	32
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНОГО ПРЕССОВАНИЯ ИЗ СТРУЖКИ СПЛАВОВ АД31 И АК12.....	34
2.1 Особенности брикетирования и влияние процесса прессования на свойства полуфабрикатов и изделий из сыпучей стружки сплава АД31.....	35
2.2 Исследование процесса получения прутков из стружки сплава АК12 с использованием схемы дискретного прессования.....	47
2.3 Выводы по главе.....	51

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ СЫПУЧЕЙ СТРУЖКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ.....	54
3.1 Моделирование уплотнения пористого материала и исследование зон неконтактной деформации при совмещенной прокатке-прессовании.....	55
3.2 Исследование структуры и свойств длинномерных деформированных полуфабрикатов из стружки сплава АД31, полученных методом СПП.....	66
3.3 Исследование структуры и свойств прутков, полученных методом непрерывного прессования из стружковых отходов сплава АК12.....	75
3.4 Новое техническое решение по конструкции устройства для получения проволоки и профилей из некомпактных материалов методом совмещенной прокатки-прессования.....	83
3.5 Выводы по главе.....	87
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ, ПОЛУЧЕННОЙ ВОЛОЧЕНИЕМ ИЗ ПРЕССОВАННЫХ РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ ПОРИСТЫХ ПРУТКОВ... ..	89
4.1 Моделирование процесса деформации пористого прутка из алюминиевого сплава АД31 при волочении.....	89
4.2 Планирование эксперимента и получение регрессионных зависимостей для оценки уровня механических свойств проволоки из стружки исследуемых сплавов.....	96
4.3 Экспериментальные исследования процесса волочения прутков из стружки сплава АД31, полученных с использованием других вариантов комбинирования процессов брикетирования и прессования....	105
4.4 Применение процесса волочения отпрессованных полуфабрикатов из стружки сплава АК12 для получения прутково-профильной продукции различного назначения.....	112

4.5 Некоторые практические приложения результатов исследований.....	119
4.6 Выводы по главе.....	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	134
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	149
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	150

ВВЕДЕНИЕ

Повышенный интерес к металлургии вторичного алюминия, в последние годы выражающийся в относительно стремительных темпах развития указанного производства, обусловлен высокими технико-экономическими показателями в структуре себестоимости продукции и возможностью реализации его в экологически более чистых вариантах [1].

Около 90 % произведенного вторичного алюминия используется в автомобильной промышленности в качестве литейных сплавов, а остальная доля приходится на деформируемые сплавы алюминия, из которых получают изделия обработкой давлением [2]. Вопросы переработки образующихся в том или ином виде отходов играют существенную роль в цикле изготовления продукции из алюминия и его сплавов. Объем перерабатываемого металла в последнее время постоянно увеличивается, поэтому стремления промышленных работников направлены на реализацию новых, более совершенных, технологий вовлечения образующихся отходов в производственный оборот. Так, например, транснациональная алюминиевая компания Hydro, Норвегия (с производством полного цикла), одной из целей в своей стратегии развития прописывает увеличение объемов производства, связанного с переработкой вторичного алюминия. В Hydro делают прогноз об увеличении объема перерабатываемого вторичного алюминия и фокусируются [3]:

- на поддержании высокого качества продуктов из переработанного вторичного алюминия;
- сокращении потерь металла в процессе переработки;
- уменьшении вредных выбросов в атмосферу и улучшении всего производственного процесса;
- разработке новых сплавов, из которых в дальнейшем можно производить продукцию специального назначения.

При оценке преимуществ получения цветных металлов и сплавов из отходов производства по сравнению с их получением из рудного сырья руководствуются следующими показателями: содержанием металла в сырье,

извлечением его в готовую продукцию, расходом топливно-энергетических ресурсов, количеством отходящих газов, которое определяет капитальные и эксплуатационные затраты на их очистку.

Рациональная переработка отходов производства по-прежнему остается важной задачей для предприятий металлургической отрасли. Благодаря переработке металлического лома удастся достичь существенного снижения затрат для всего производства. Экономия проявляется и в затратах на приобретение основного материала шихтового типа, и в расходах на оплату энергоресурсов, и во многом другом. Благодаря переработке и вторичному использованию лома металла снижается общая нагрузка на природные ресурсы, которые достаточно сильно истощились к настоящему времени, а также улучшается общая экологическая обстановка.

Однако осуществляемая система переработки отходов цветных металлов через их переплав не полностью удовлетворяет требованиям экономии и рационального использования вторичных металлов и сплавов. Недостаточная эффективность традиционной технологии при переработке, например стружковых отходов, обусловлена такими факторами, как повышенный угар металла, увеличенный объем газопылевых выбросов, значительные затраты электроэнергии на переплав, высокая трудоемкость.

Особенно это актуально для отходов, образующихся при обработке алюминия и его сплавов в виде стружки в машиностроительной, металлургической и других отраслях промышленности, так как их количество значительно превышает объемы отходов других цветных металлов и сплавов.

Таким образом, совершенствование технологии переработки отходов стружковых материалов без их переплава, основанной на применении методов порошковой металлургии и обработки металлов давлением (ОМД), является актуальной задачей.

Данная работа является результатом комплекса экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в течение ряда лет учеными Сибирского и Уральского федеральных университетов, выполненных в рамках проекта «Разработка технологий и устройств для производства совмещенными методами изделий из новых материалов на основе сплавов цветных металлов и

исследование их свойств» по программе развития СФУ «Поддержка на конкурсной основе разработок по научно-методическому обеспечению образовательного процесса по приоритетным областям развития СФУ», молодежных грантов СФУ, а также грантов Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности.

В трудах таких ученых, как В. З. Жилкин, Н. В. Шепельский, В. Н. Щерба, Ю. Г. Дорофеев, О. В. Падалко, В. М. Сегал, О.А. Ганаго, И. Ю. Мезин, Н. А. Белов, Г.И. Рааб, В.В. Капорович, Н.А. Костин, С. С. Кипарисов, В. Н. Корнилов, Ю. Н. Логинов, Ю. А. Горбунов, А.Г. Залазинский и др. представлена информация об особенностях обработки давлением некомпактных металлических материалов, формировании структуры, напряженно-деформированном состоянии и уровне механических свойств длинномерных полуфабрикатов, в том числе и из сплавов на основе алюминия.

Однако, несмотря на большое количество научных работ в этой области, технологии переработки в полуфабрикаты и изделия металлической стружки, особенно из сплавов на основе алюминия, в основном сосредоточены на применении несовершенного плавильного передела, что обуславливает необходимость поиска и опробования новых научно-технологических решений, направленных на реализацию экономически более выгодных вариантов, исключая стадию переплава.

Целью диссертационной работы является создание комплекса научно-технологических решений для повышения эффективности переработки сортовых сыпучих стружковых отходов из сплавов алюминия АД31 и АК12.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

– анализ научно-технической литературы в рассматриваемой области с целью выбора потенциальных методов переработки сыпучих отходов из сплавов алюминия;

– формирование общей технологической схемы для переработки сыпучих металлических отходов с использованием приемов порошковой металлургии и ОМД;

– исследование структуры и свойств длинномерных деформированных полуфабрикатов, изготовленных за счет реализации различных способов брикетирования и последующего дискретного прессования из стружки сплавов АД31 и АК12;

– компьютерное моделирование и оценка возможности получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из предварительно брикетированной стружки методом непрерывного прессования;

– исследование структуры и свойств длинномерных деформированных полуфабрикатов, полученных путем брикетирования и непрерывного прессования из стружки сплавов АД31 и АК12;

– планирование эксперимента и исследование структуры и свойств длинномерных деформированных полуфабрикатов из исследуемых сплавов, полученных волочением из прессованных разными способами прутков.

Научную новизну имеют следующие результаты.

1. Установлены закономерности формирования свойств по длине длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов АД31 и АК12, изготовленных с использованием технологической схемы: стружка–брикетирование–дискретное прессование.

2. Выявлены закономерности изменения свойств по длине длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов АД31 и АК12, полученных по технологической схеме: стружка–брикетирование–непрерывное прессование.

3. На основе результатов компьютерного моделирования дана оценка влияния технологических параметров процесса непрерывного прессования стружковой заготовки из исследуемых сплавов на характер течения металла и обоснован диапазон их изменения.

4. Установлены закономерности изменения механических свойств при волочении полученных прессованием заготовок из стружки исследуемых сплавов в зависимости от деформационно-скоростных условий обработки и применения отжигов.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Разработано и защищено патентом РФ № 2429943 устройство для получения проволоки и профилей из некомпактных материалов, позволяющее реализовать метод непрерывного прессования для изготовления деформированных полуфабрикатов из стружки сплавов АД31 и АК12.

2. С применением методов математического планирования эксперимента получены регрессионные зависимости для расчета прочностных свойств проволоки после волочения заготовок, полученных прессованием стружковых отходов исследуемых сплавов.

3. Обоснованы и практически опробованы технологические режимы горячего и холодного брикетирования, прессования, волочения и отжига для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов в виде прутков и проволоки с заданным уровнем прочностных и пластических свойств.

4. На всех технологических переделах изучена структура металла, начиная от некомпактного и заканчивая деформированным состоянием, в зависимости от условий и параметров термомеханической обработки.

5. Результаты исследований внедрены в учебный процесс СФУ и используются для подготовки бакалавров и магистров по направлению «Металлургия», а также аспирантов по специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением.

Методология и методы исследований базируются на основных законах термодинамики и теории обработки металлов давлением с применением современных методик изучения механических свойств и металлографического анализа, а также численного моделирования с использованием ряда программных комплексов.

На защиту выносятся:

– результаты компьютерного моделирования процессов совмещенной прокатки-прессования (программные комплексы QFORM V8) и волочения (программный комплекс ABAQUS) прутков и проволоки из стружки сплава АД31;

– технологические решения для получения прутков и проволоки из сыпучих стружковых отходов алюминиевых сплавов АД31 и АК12 с требуемым уровнем прочностных и пластических свойств;

– результаты экспериментальных исследований, включающие оценку уровня и характер изменения прочностных и пластических свойств в процессе термомеханической обработки полуфабрикатов из стружки сплавов АД31 и АК12.

Степень достоверности научных положений и полученных результатов доказана применением научно обоснованных методов обработки металлов давлением, компьютерного моделирования, использованием методов математического планирования эксперимента и статистической обработки результатов; практической реализацией технологических решений.

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на ежегодной международной научно-технической Уральской школе-семинаре металловедов – молодых ученых (г. Екатеринбург, 2015, 2016, 2017 г.г.), ежегодных международных конгрессах «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 2015, 2016 г.г.), II Международной научно-практической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства» (г. Магнитогорск, 2016 г.), международных конгрессах «Техноген-2017» и «Техноген-2019» «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» (г. Екатеринбург, 2017, 2019 гг.) и др.

Результаты диссертационной работы отражены в 25 печатных трудах, в том числе 1 монографии, 11 статьях в изданиях из перечня ВАК, 3 статьях в базах цитирования Scopus и Web of Science и 1 патенте РФ.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 105 источников, и трех приложений. Основной материал изложен на 150 страницах, включая 15 таблиц и 65 рисунков.

ГЛАВА 1. ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Классификация отходов алюминиевых сплавов и особенности их подготовки

К потенциальным вторичным ресурсам согласно стандарту [4] относят весь объем отходов, образующихся в сферах производства и потребления, кроме безвозвратных потерь. К отходам производства [4] относят остатки сырья, материалов и полуфабрикатов, образующиеся в процессе производства, которые частично или полностью утратили первоначальные потребительские качества и не соответствуют стандартам. Отходы производства делят на утилизируемые, для которых существует определенная технология переработки и вовлечения их в оборот и не утилизируемые, для которых отсутствует технология переработки или при наличии технологии утилизации вовлекать их в оборот экономически нецелесообразно.

Стружка появляется на стадиях металлургического производства, литейного передела и металлообработки (до 40% от общего объема отходов [5]). Основной объем стружки (вьюнообразной, сыпучей и смешанной) образуется при обработке на металлорежущих станках (токарных, фрезерных и т. п.).

В Европе, например в таких странах, как Германия, Австрия, Чехия, при рассмотрении вопросов получения алюминия из вторичного сырья принята следующая классификация алюминиевых отходов (таблица 1.1) [6].

В неподготовленной к плавке стружке среднее содержание металла составляет 73÷75 %. В отдельных партиях оно колеблется в пределах от нескольких процентов (стружка находилась на воздухе длительное время) до 85÷90 % (для чистой, только что образовавшейся стружки). При плавке в производственных условиях потери на угар составляют ~ 5 %.

Таблица 1.1 – Европейская классификация вторичного алюминиевого сырья

Название	Характеристики категории ломов и скрапа
Abweg	Незасоренный электротехнический лом, проволочный скрап из чистого алюминия без инородных примесей
Alter	Лом и чистый скрап из прессованных профилей, не содержащие примесей и инородных включений
April	Дробленые материалы, полученные прокаткой, используемые в бытовых электроприборах и не содержащие сплавов системы Al–Cu и Al–Zn
Apsis	Измельченный лом и отходы, содержащие железо
Assel	Литейный скрап (литники, донники, обрезь, крупная стружка), не содержащий железа
Autor	Мелкая стружка и обрезь после механической обработки изделий

Загрязнение стружки различными материалами значительно влияет на выход годного металла, получаемого после переплава. Например, содержание масла в стружке колеблется от нескольких десятых долей процента до 20 % и выше. Кроме того, в алюминиевой стружке, поступающей на заводы для переработки, могут присутствовать частицы других металлов и сплавов, а также влага, содержание которой может достигать 10 %.

Общая технологическая схема подготовки стружки к плавке приведена на рисунке 1.1.

Подготовленная к плавке стружка должна быть сыпучей, поэтому витую стружку измельчают на дробилках различных конструкций, хотя в некоторых случаях вьюнообразную стружку только пакетируют и отправляют на переплавку.

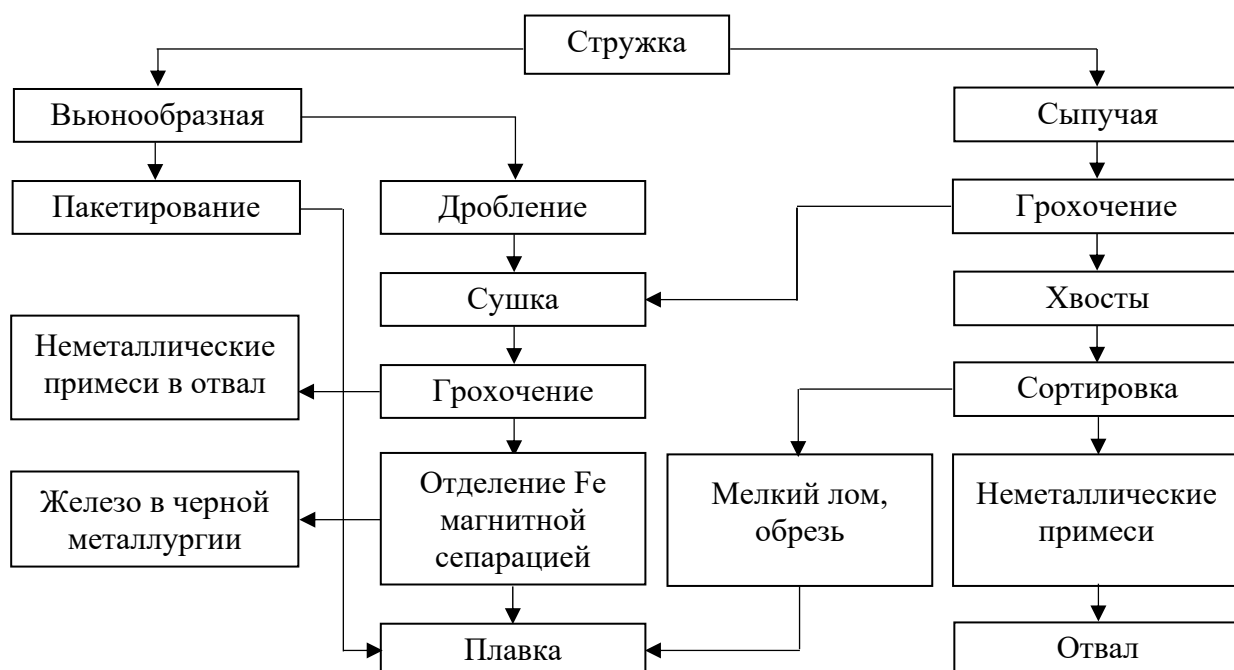


Рисунок 1.1 – Технологическая схема подготовки стружки к плавке

При содержании масла в стружке более 6 % целесообразно проводить операцию центрифугирования, после которой остаток масла в стружке составляет $1,5 \div 2,0$ %. Полностью удалить масло из стружки также можно, промывая ее после первичного центрифугирования в водном растворе, содержащем 6 % жидкого стекла, 4 % фосфорнокислого натрия, 1 % едкого натра, 0,5 % хромовокислого калия. Раствор можно использовать многократно, не обновляя, поскольку он безопасен в обращении.

1.2 Обзор существующих методов переработки стружковых отходов алюминиевых сплавов

В большинстве случаев отходы цветных металлов возвращаются в производственный оборот через их переплав в печах при атмосферном давлении. Основная цель плавки – приготовление сплавов, соответствующих по химическому составу, физико-химическим и механическим свойствам требованиям стандартов. Указанный способ, получивший наибольшее распространение на практике, может осуществляться по трем вариантам:

– переплав прошедшей предварительную подготовку стружки россыпью путем погружения ее небольшими партиями в печь с применением соответствующих защитных флюсов;

– переплав стружки в брикетированном виде с погружением в ванну с расплавленным металлом;

– переплав стружки с ее предварительной подготовкой на специализированной технологической линии.

Каждое из направлений имеет свои преимущества и недостатки (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Преимущества и недостатки различных способов переработки стружки путем ее переплава

Способ переплава стружки	Преимущества	Недостатки
Россыпью путем погружения небольшими партиями в печь с применением соответствующих защитных флюсов	Нет необходимости в специальном оборудовании	Повышенный угар металла (в 2÷3 раза превышает угар при переплаве в брикетированном виде), большой объем газопылевых выбросов, низкая производительность печи, дополнительные затраты на флюс
В брикетированном виде с погружением брикетов в раскаленную печь	Сокращение потерь металла, повышение производительности плавильных агрегатов в среднем на 10÷12 % по сравнению с переплавом россыпью, уменьшение угара по сравнению с плавкой россыпью, возвращение дорогих смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) для повторного применения в производстве	Предварительное компактирование стружки, затраты на флюс
С предварительной подготовкой на специальной технологической линии	Уменьшение потерь металла, экологичность процесса	Большие капитальные затраты

Общий недостаток для всех этих способов – низкая производительность, которая, в свою очередь, является следствием того, что стружку, как правило, плавят без применения защитных сред, в лучшем случае при использовании рафинирующего флюса [7, 8].

При отсутствии на предприятиях специальных брикетных установок переработка стружки преимущественно производится переплавкой ее россыпью. Известен ряд способов переплава алюминиевой стружки в газовых отражательных, электрических, плазменно-дуговых, солевых печах, а также электрошлаковый способ.

Причин низкой производительности плавления стружки россыпью несколько. Во-первых, дисперсные куски или мелкая стружка металлов и сплавов насыпаются на неподвижную поверхность флюса, из-за чего они плохо смешиваются с ним, что вызывает первую потерю производительности процесса. Во-вторых, рафинирующие флюсы плохо смачивают металл и поэтому плохо усваивают его. В-третьих, флюс не растворяет металл, что также замедляет процесс плавки. В-четвертых, флюс имеет значительно более низкую теплоемкость и теплопроводность, чем металл. Поэтому флюс медленно нагревается и быстро теряет тепло при вводе в него отходов, что является существенным фактором замедления процесса переплава и снижения производительности [9]. При плавке окисленной стружки россыпью образуется большое количество сухих шлаков, происходит зарастание тигля и снижается выделяемая активная мощность. Нарастание шлака толщиной 2÷3 см приводит к снижению активной мощности на 10÷15 %.

Россыпью стружковые отходы плавят при условии, что в печи имеется жидкая ванна объемом приблизительно 30 % от емкости печи. Одновременная завалка стружки в печь составляет 20 % от веса жидкой ванны. Стружку загружают при температуре ванны с металлом 750÷800 °С. После загрузки каждой порции шихту покрывают флюсом, а затем вмешивают стружку в жидкий металл. Жидкую ванну вновь нагревают до 800 °С и таким же способом проплавляют следующие порции стружки. После расплавления 50 %

предназначенной для плавки стружки шлак доводят до совершенно жидкого состояния и частично его снимают, чтобы оставшийся слой был не толще 50 мм. Остальное количество стружки плавят таким же способом. Общий расход флюсов приведен в таблице 1.3 [10].

Таблица 1.3 – Расход флюсов при переплавке сыпучих стружковых отходов алюминия

Металлургический выход, %	Расход флюса, % от веса стружки
50	100
60	75
70	60
80	50
90	40

Таким образом, переплав стружки россыпью вести нерационально вследствие значительного угара и плохой ее теплопроводности в насыпном виде. Влажная россыпная стружка быстро корродирует, этот процесс ускоряют щелочные эмульсии. Все эти факторы приводят к значительному снижению выхода металла при плавке стружки россыпью. Поэтому перед плавкой рациональнее осуществлять первичную подготовку алюминиевой стружки. Под первичной подготовкой металлических отходов понимают приведение их в состояние, обеспечивающее эффективную последующую металлургическую переработку. Одной из операций первичной подготовки является брикетирование.

Брикетирование уменьшает объем, занимаемый стружкой, до 10÷15 раз. Благодаря установке брикетировочного оборудования непосредственно у металлорежущих станков и уменьшению объемов стружки, значительно снижаются расходы на обработку и транспортировку. Важнейшим фактором высокой эффективности применения брикетирования является пониженный угар при переработке стружки. При брикетировании уменьшается контактная поверхность стружки, что снижает ее угар во время плавления в несколько раз.

Более того, при плавке стружки в брикетированном виде расход флюсов сокращается на $15\div 20$ %.

На процесс брикетирования оказывает влияние присутствие в стружке остатков используемой при механообработке смазочно-охлаждающей жидкости, что заметно ухудшает качество брикетов. Количество выжимаемой смазочно-охлаждающей жидкости иногда достигает $10\div 15$ % от веса. Остаточная влажность зависит от плотности материала. Она определяется размером стружки, типом применяемой смазочно-охлаждающей жидкости, а также прикладываемым при брикетировании давлением. Обычно остаточная влажность составляет $3\div 7$ %.

Во многих случаях брикетирование осуществляется на специализированных брикетировочных прессах. Измельченная стружка загружается в приемный бункер, далее подается в камеру прессования. Прессующий поршень сжимает стружку в брикет. В процессе брикетирования смазочно-охлаждающая жидкость отжимается из стружки. В результате металлическая стружка перерабатывается в брикеты размером от 60×40 до 150×120 мм. Сечение брикета может быть как прямоугольным, так и круглым. Длина брикета варьируется и может быть задана в определенных пределах. Выбор формы брикета обуславливается требуемой производительностью и характеристиками исходного материала.

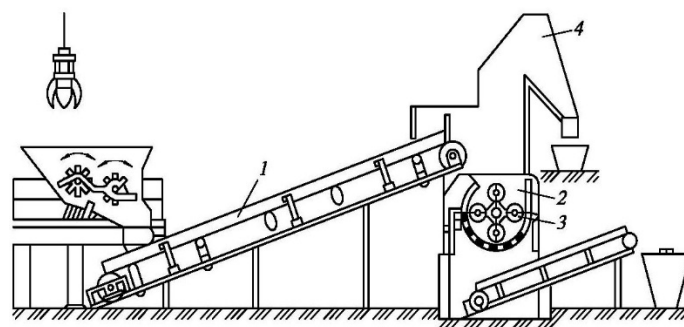
Стоимость металлических отходов значительно увеличивается после их брикетирования. Немаловажным фактором является и возврат СОЖ, отжатой из влажной стружки, обратно в производство для повторного использования. При переплавке брикетов процент угара существенно ниже по сравнению с переплавом насыпной стружкой, что, соответственно, выражается в более высокой прибыльности.

Однако даже при использовании упомянутого выше брикетировочного оборудования имеются возможности для дальнейшего совершенствования процесса. В частности, для комплексной переработки большого объема сыпучих стружковых отходов некоторые предприятия применяют специализированные поточные линии (рисунок 1.2, *a*), один из вариантов практического исполнения которой разработан Инженерно-технологическим центром ЗАО «КЕМЕТ»

(г. Санкт-Петербург). Оборудование для переработки металлической стружки, входящее в нее, может использоваться как индивидуально, выполняя определенную функцию в технологическом процессе утилизации стружки, так и в составе специально сформированного комплекса. Обычно это оборудование используется как централизованные технологические системы, которые могут подходить для одного или нескольких материалов при автоматическом цикле очистки между партиями. В зависимости от поставленной задачи стружечные системы могут комплектоваться различными устройствами: загрузочными подъемниками, измельчителями, центрифугами, сепараторами концевых отходов, брикетировочными прессами, конвейерами.



а



б

Рисунок 1.2 – Оборудование для переработки стружки в брикеты (а) и ее дробления (б)

Применение в шихте алюминиевой стружки, не прошедшей предварительной обработки, неизбежно снижает качество расплава. Обладая развитой удельной поверхностью, стружка будет интенсивно окисляться, находясь на поверхности расплава. Для полноты извлечения примесей и увеличения насыпной массы стружку иногда подвергают измельчению. Для измельчения стружки на алюминиевой основе используют стружкодробилки. Стружкодробильный агрегат модели СДА-7 (рисунок 1.2, б) выполнен на базе молотковых дробилок. Он состоит из ленточного транспортера 1, молотковой дробилки 2, молотка 3, ловушки 4. Стружка загружается краном порциями по 200÷300 кг в приемное устройство, где происходит ее разрыхление и

предварительное дробление. После этого стружка с помощью ленточного транспортера 1 подается в молотковую дробилку 2, а оттуда дробленая стружка с помощью другого транспортера подается в сборочный контейнер.

Для дробления отходов цветных металлов получили распространение молотковые, роторные, ножевые, щековые и виброщековые, конусные и конусно-инерционные, валковые и другие дробилки, а также мельницы.

Последующие операции обработки дробленой стружки проводят на линиях обезжиривания и сушки. Эти линии по технологии процесса обезжиривания делятся на линии гидрохимического и термического обезжиривания. Гидрохимическая очистка заключается в промывке стружки горячим ($60\div 80$ °С) щелочным раствором в шнековых смесителях или центрифугах. После удаления раствора в стружке остается не более 0,2 % влаги и масла. Раствор после очистки от твердых частиц и масла возвращают в процесс. Промытую стружку направляют на металлургическую переработку.

В состав линии термического обезжиривания и сушки стружки входят следующие технологические узлы: приема сыпучей и дробленой стружки; предварительного грохочения стружки для выделения негабаритных включений и посторонних предметов перед сушкой; обезжиривания и сушки, состоящий из барабанного сушила, камеры дожигания возгонов, установки газопылеулавливания; контрольного грохочения и отсева окалина, земляных отходов, металлической пыли; электромагнитной сепарации. Продукцией подобных установок является стружка с содержанием влаги не более 1,0 %, СОЖ – не более 0,4 %. Стоимость отечественных производственных линий в полном комплекте достигает трех миллионов рублей [5].

Современные зарубежные установки, перерабатывающие стружечные отходы, имеют экономические и экологические преимущества [11]. Примером может служить система ALUSWIRLER® (рисунок 1.3, а), предназначенная для непрерывной плавки алюминиевой стружки путем погружения в постоянно перемешиваемый расплавленный металл. Стружка плавится вследствие погружения в жидкий металл и быстрого переноса тепла от расплава.

Перемешивание расплава осуществляется с помощью механического насоса с электрическим приводом. Камера ALUSWIRLER® представляет собой прикрепленную к основной камере печь, связанную каналами, которые направляют поток расплавленного металла, генерируемый с помощью механического насоса. Рабочее колесо, его корпус и камеры потока являются керамическими, литыми, легко заменяемыми формами. Процесс плавления происходит настолько быстро, что стружка плавится прежде, чем попадает в главную камеру печи. Дополнительно система ALUSWIRLER® может быть оборудована системой IDEX® (рисунок 1.3, б), которая предназначена для удаления органических (краски, лаки, масла) и неорганических (вода) веществ из широкого спектра алюминиевых отходов с помощью непрерывного термического процесса.

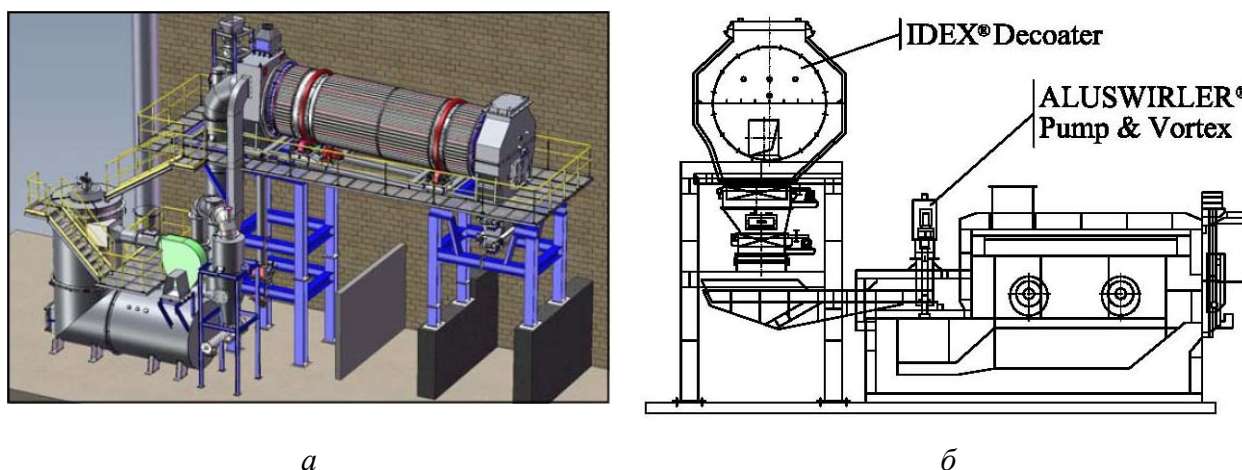


Рисунок 1.3 – Общий вид (а) и схема расположения (б) систем ALUSWIRLER® и IDEX® в одной производственной линии

Экономические и экологические преимущества системы IDEX® следующие: низкое потребление энергии; уменьшенные потери металла и потребление энергии в процессе плавки; повышенная безопасность; полное сжигание генерируемых газов; пониженные концентрации выбросов в окружающую среду.

Предварительная обработка стружковых отходов включает:

- помещение стружки в корзины;

- измельчение;
- пропуск через центробежный сепаратор, чтобы свести к минимуму (до 3÷5 %) содержание смазочных материалов и воды;
- пропуск через магнитный сепаратор для устранения железистых включений;
- сушку;
- пропуск через винтовые конвейеры с переменной скоростью вращения;
- погружение в роторную сушильную камеру для полного испарения смазочных материалов и воды.

Таким образом, представленная зарубежная производственная линия предполагает повышенный выход годного металла стружки и минимально возможные вредные воздействия на окружающую среду, но стоимость такой установки варьируется от 500 000 до 1 000 000 евро.

1.3 Требования к исходному вторичному сырью, поступающему в переработку для получения из него полуфабрикатов и изделий

В качестве исходного вторичного сырья для получения изделий и полуфабрикатов из алюминия и его сплавов без применения плавильного передела могут использоваться, в первую очередь, стружковые отходы, образующиеся при механической обработке металлопродукции из соответствующих металлов и сплавов. Естественно, что любые отходы по такой схеме перерабатываться не могут. Следовательно, при реализации указанного подхода важно выявить те определяющие факторы, оценив которые, можно сформулировать ряд основных ограничений по видам отходов, которые потенциально могут служить исходным сырьем для получения изделий. Из широкого перечня таких факторов наиболее значимыми являются следующие [12]:

- достоверность химического состава исходного сырья;

- степень чистоты (степень загрязнения) исходного сырья;
- размер и форма частиц исходного сырья;
- степень освежения исходного сырья и пропорции составления компактируемой массы из сырья одного химического состава, но различного происхождения;
- особенности физико-химических и механических свойств металлов и сплавов, из которых состоит вторичное сырье, в зависимости от мест его образования и типа применяемого при механообработке металлорежущего оборудования.

Достоверность химического состава исходного сырья обеспечивает соблюдение требуемого химического состава получаемых изделий, а при некоторых случаях затрагивает вопросы точности формирования состава прессуемой стружковой композиции. Если взятые для приготовления расчетной сыпучей массы ее составляющие имеют фактически иной химический состав по содержанию компонентов и примесей против указываемого в сопроводительных документах на них, то неизбежно получение композиционных составов, не соответствующих расчетным. А следовательно, будет происходить выход в брак по несоответствию заданному химическому составу производимых из данных смесей полуфабрикатов. Переделка такого брака, если она вообще потенциально возможна, сопряжена со значительными производственными затратами и экономически вряд ли целесообразна.

Данному фактору нужно уделять особое внимание, для чего необходима четкая организация входного контроля перерабатываемых материалов и обязательность проведения химического анализа взятых от каждой партии проб фрагментов отходов.

Под степенью чистоты (степень загрязнения) исходного сырья следует понимать сведения о химическом составе исходного стружкового сырья и степени чистоты поверхности, что особенно важно для мелкой сыпучей стружки. В частности, практически все стружковые отходы механообработки загрязнены

различного рода жировыми технологическими смазками, адсорбированными и абсорбированными газами, следами от присутствия влаги и др. Все эти загрязнения существенно влияют на ход горячего компактирования, а следовательно, и на качество брикетов и прессовок в плане их насыщения газами, окисными включениями и другими вредными примесями, что может привести в конечном счете к технологическому браку изготавливаемых из них полуфабрикатов и изделий.

Размер и форма частиц исходного сырья характеризуют исходные стружковые материалы с позиции развитости поверхности их частиц, и дает возможность оценивать качественно, насколько сильно могут быть загрязнены исходные материалы адсорбированными ими влагой, различными газами, смазками и другими веществами, а также позволяет выбрать метод очистки для подготовки этих материалов к компактированию. Кроме того, этот фактор характеризует исходные материалы с точки зрения возможности их компактирования в имеющейся пресс-форме заданных конструкции и размеров на выбираемом оборудовании определенного типа и мощности без применения мер защиты, или, наоборот, с защитой от нежелательного окисления. Материал в виде крупной стружки без предварительной подпрессовки не может быть плотно уложен в пресс-форме в том количестве, которое необходимо для получения, в конечном счете, заготовки для прессования требуемого соотношения высоты к диаметру.

Степень освежения исходного сырья и пропорции составления компактируемой массы из сырья одного химического состава, но различного происхождения, имеет большое значение для формирования прессовок повышенной, высокой и особой степени чистоты, а также для прессовок под последующую обработку давлением, осуществляемую со значительными степенями деформации.

Возвращаемые в оборот стружковые отходы собственного производства, имеющие известный химический состав, всегда обогащены некоторыми примесями против чистоты первичных материалов, а следовательно, степень

загрязнения многократно обрабатываемых материалов будет непрерывно возрастать, что приводит к снижению устойчивости протекания процессов обработки давлением скомпактированных прессовок, браку получаемых при этом полуфабрикатов, различного рода металлургическим дефектам, связанным с накапливанием в составе различного рода примесей.

Особенности физико-химических и механических свойств металлов и сплавов, из которых состоит вторичное сырье, в зависимости от мест его образования и типа применяемого металлорежущего оборудования учитываются в первую очередь при построении технологического процесса производства изделий и полуфабрикатов из стружковых отходов того или иного металла или сплава. Исходя из значений механических характеристик исходных компонентов сырья, знания общих закономерностей изменения этих свойств при определенных температурно-деформационных условиях обработки, можно обеспечить различные состояния компонентов, а также спрогнозировать процессы взаимодействия их между собой.

Важным аспектом являются условия формирования прочной металлической связи при взаимодействии частиц стружки, подвергаемой обработке давлением. В этом смысле под схватыванием понимают формирование металлической связи между совместно деформируемыми частицами металлов [13]. При этом выделяют способы сварки со свободным и принудительным деформированием [14]. Последний способ реализуется в результате совместной пластической деформации свариваемых частиц металлов при различных способах обработки давлением. Для обработки стружковых материалов, как правило, целесообразно применять процессы горячей прокатки и прессования. При этом для процессов сварки с принудительным деформированием характерен широкий интервал изменения технологических факторов, оказывающих влияние на качество сварного соединения. Считается, что высокое качество сварного шва достигается только при определенных условиях пластической деформации, а основными факторами, определяющими его прочность, являются химический состав сплава, чистота поверхности, наличие и толщина окисных пленок, температура, степень

деформации и давление на контакте. Учет этих факторов дал возможность предложить несколько гипотез схватывания частиц металла в процессе пластической деформации [13]: рекристаллизационная; диффузионная; пленочная; деформационная; энергетическая и др.

Анализ этих гипотез позволяет сделать общие выводы, приведенные в работе [13]. Применительно к рассматриваемым процессам экструдирования металла, особенно непрерывного прессования, можно отметить, что высокие гидростатические давления в очаге пластической деформации и благоприятная схема всестороннего неравномерного сжатия обеспечивают создание значительных давлений на свариваемых поверхностях. Время протекания процесса вполне достаточно для формирования физического контакта, а температура, которая для алюминиевых сплавов находится в интервале 350÷500 °С, обеспечивает получение качественного сварного соединения.

Таким образом, правильный выбор оптимального температурно-скоростного режима деформирования металлической стружки, а также обеспечив другие условия для лучшего схватывания частиц металла, обозначенные выше, можно получить качественные прессовки для дальнейшей обработки.

1.4 Общая характеристика свойств алюминиевых сплавов АД31 и АК12

Из широкого спектра алюминиевых сплавов, используемых для изготовления различного рода продукции в металлургической и машиностроительных отраслях, значительную долю составляют стружечные отходы из деформируемого сплава АД31, в основном получаемые при производстве прессованных прутков, профилей и труб [15], и литейного сплава АК12, образующиеся при производстве литых дисков автомобильных колес [16]. Поэтому эти сплавы выбраны для исследований. Химические составы этих сплавов согласно ГОСТ 4784–97 (для АД31) и ГОСТ 1583–93 (для АК12) приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Химический состав алюминиевых сплавов

Сплав	Массовая доля компонента, %								
	Al	Mg	Si	Cu	Fe	Mn	Zn	Ti	Zr
АД31	Основа	0,45÷0,90	0,3÷0,7	0,1	0,35÷0,50	0,1÷0,2	0,10÷0,15	0,10÷0,15	-
АК12	Основа	0,10	10,0÷13,0	0,6	1,50	0,5	0,30	0,10	0,1

Сплав АД31, относящийся к сплавам системы Al–Mg–Si, характеризуется высокими пластическими свойствами при обработке давлением в горячем состоянии и повышенной коррозионной стойкостью. Коррозионная стойкость сплава практически не снижается при сварке, при этом он не склонен к коррозионному растрескиванию под напряжением. Сплав АД31 интенсивно упрочняется при термической обработке, основными фазами-упрочнителями в сплаве являются Mg_2Si и Al_3Fe . Механические свойства металла после прессования в различном состоянии приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Механические свойства прессованной продукции из сплава АД31

Состояние	Временное	Относительное
	сопротивление разрыву σ_b , МПа	удлинение δ , %
Отожженное	до 150	17
Закаленное и естественно состаренное	150÷210	14
Закаленное и искусственно состаренное	210÷310	8

Кривые деформационного упрочнения сплава АД31 при различных температурах и скоростях деформации [17] приведены на рисунке 1.4.

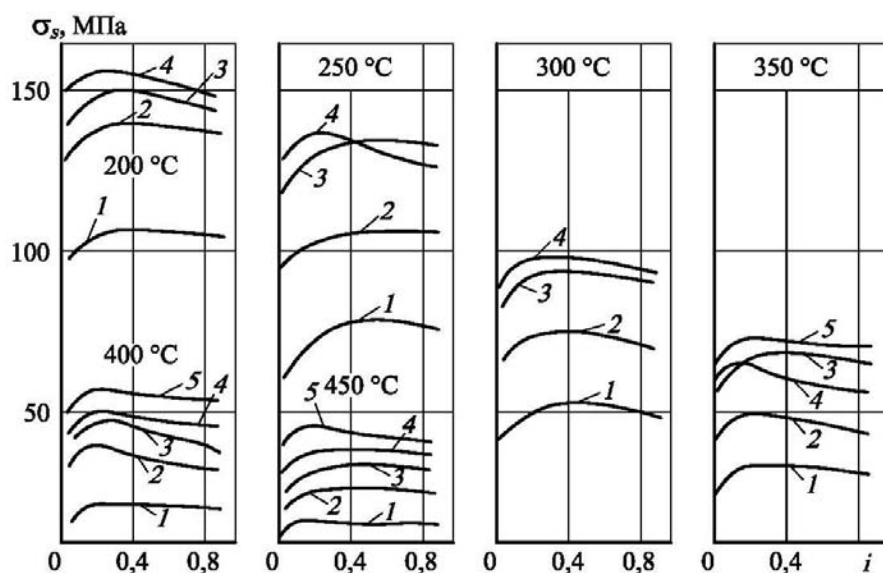


Рисунок 1.4 – Кривые деформационного упрочнения сплава АД31 при различных скоростях деформации, s^{-1} : 1 – 0,01, 2 – 1, 3 – 10, 4 – 100, 5 – 200

Сплав АК12, который является представителем сплавов системы Al-Si, обладает требуемым уровнем механических характеристик (таблица 1.6), износостойкостью и жидкотекучестью [18], поэтому применяется в основном при литье и реже при обработке металлов давлением.

Таблица 1.6 – Механические свойства литых и деформированных полуфабрикатов из сплава АК12

Марка	Вид обработки	Вид термообработки	σ_b , МПа.	δ , %.	НВ
			не менее		
АК12	Литье в песчаные формы	-	147	4,0	50
	Литье в кокиль	-	157	1,0	50
	Литье в кокиль	Отжиг	137	4,0	50
	Литье под давлением	Отжиг	147	2,0	50
	Деформированный полуфабрикат	-	166	21,4	-

Таким образом, для исследований выбраны два сплава, имеющие различные физико-механические и эксплуатационные свойства, поэтому технологии переработки стружки, образующейся при производстве литых и деформированных полуфабрикатов из них, могут существенно различаться.

1.5 Анализ технологии переработки сыпучих металлических отходов с использованием приемов порошковой металлургии и процессов обработки давлением

Заметная роль в обеспечении высокого уровня физико-механических свойств и приемлемой себестоимости металлоизделий отводится технологиям их производства. Современные тенденции их развития связаны с экономией материальных ресурсов путем наиболее полного и комплексного использования существующих источников сырья, изыскания новых нетрадиционных его видов и организацией на их базе малоотходных производств. Плавильный передел и связанные с ним заготовительно-транспортные операции, являясь эффективным средством переработки крупногабаритного лома и отходов, на существующем уровне развития процессов сбора, хранения, транспортирования отходов и собственно металлургических процессов, не обеспечивают, по нашему мнению, необходимой эффективности переработки стружковых отходов, особенно мелких сыпучих фракций.

Недостатки традиционного подхода по переработке стружковых отходов могут быть сведены к минимуму при полном отказе от их переплава в любом виде и применении приемов, используемых в порошковой металлургии и гранульных технологиях [19–22].

Важнейшими факторами, определяющими промышленную конкурентоспособность указанного направления, являются еще более жесткое, чем перед переплавом, обеспечение селективного (марочного) сбора стружковых отходов, четкая организация работ по удалению их из зоны механической обработки, а также соблюдение определенных условий хранения их перед переработкой. Выполнение перечисленных требований во многих случаях исключает необходимость проведения таких операций, как сепарация твердых и жидких, магнитных и немагнитных компонентов; обезжиривание и предварительная тепловая обработка отходов. В конечном счете, все зависит от

состояния поступающей на переработку стружки и назначения получаемых из нее изделий.

Следует отметить, что примеры практической реализации рассматриваемой технологической схемы время от времени приводятся в периодических технических изданиях [1, 23–31]. Но, как правило, в них речь идет о переработке в полуфабрикаты и изделия стружки определенного химического состава, образующейся на конкретном металлургическом или машиностроительном предприятии. Задачи, на решение которых направлены такого рода публикации, связаны с изготовлением металлопродукции, являющейся альтернативой продукции, произведенной из литых металлов и сплавов. Критерием в данном случае служит соответствие уровня механических и эксплуатационных характеристик полученных изделий параметрам, оговоренным в действующих технических условиях.

Однако более перспективным представляется разработка схем, связанных с созданием новых специфических функциональных композиционных или структурно-неоднородных материалов, формирование которых базируется на консолидации различного рода дискретных сред с определенным сочетанием компонентов в твердой фазе [32]. Основу таких материалов и должны составлять сортные сыпучие стружковые отходы, образующиеся при механической обработке металлических изделий на металлообрабатывающих станках и агрегатах. Термин «сортные» в целом характеризует стружковые отходы цветных металлов и сплавов по видам, засоренности и размерам, хотя и предполагает некоторую произвольность форм, размеров и свойств частиц. Обязательным в этом случае является выполнение критериев достоверности и определенности химического состава исходного сырья, а также степени чистоты поверхности частиц по загрязнениям особого рода, которые обычно не учитываются при соблюдении общих требований химического состава. Особенно это относится к материалам с сильно развитой удельной поверхностью типа металлических опилок.

Разработка материалов с ультрамелкой зеренной структурой связана с осуществлением технологий термической и деформационной обработки стружки, обеспечивающих формирование нанофрагментов в твердой матрице. Существенная роль в формировании необходимых структуры и уровня свойств изделий, получаемых из стружки, отводится реализуемой технологической схеме, включающей этапы брикетирования, спекания, дополнительных горячей и холодной пластической деформации, а также термообработки. В совокупном виде они должны как обеспечить заданную организацию движения макропоток металла, связанную с развитием значительных деформаций сдвига, так и интенсифицировать процессы, характерные для протекания механически активируемой тепловой диффузии, а также диффузии, обусловленной генерацией и перемещением неравновесных дефектов. При этом уменьшение объемного содержания пор вызывается главным образом изменением относительного положения контактирующих микрообъемов материала, сопровождающимся как интенсивными сдвиговыми деформациями, по контактирующим поверхностям деформируемых частиц, так и внутренним сдвигом в деформируемом материале. При такой деформации создаются благоприятные условия для разрушения и диспергирования поверхностных окисных пленок, обнажения ювенильных поверхностей в зоне пор и на поверхностях отдельных частиц, а также образования на этих поверхностях узлов схватывания. Роль высокотемпературного нагрева, помимо снижения общего уровня прочностных характеристик частиц компактируемого материала, дополнительно сводится к растворению, разложению и перекристаллизации компонентов, а также развитию диффузионных процессов.

Для получения изделий из стружковых материалов не существует единого универсального варианта осуществления технологического процесса (цепочки технологических операций), предполагающего к тому же использование однотипного оборудования и приемов, характерных, например, только для процессов порошковой металлургии. Для разработки и опробования таких технологий следует использовать комплексный подход, подразумевающий

всесторонний последовательный анализ возможностей в решении конкретных задач каждой из включенных в схему операций, а также оценку экономически целесообразных путей практической их реализации [22, 33]. Таким образом, анализ научно-технической литературы позволил предложить общую технологическую схему для переработки стружки цветных металлов и сплавов, исключаящую переplав (рисунок 1.5).

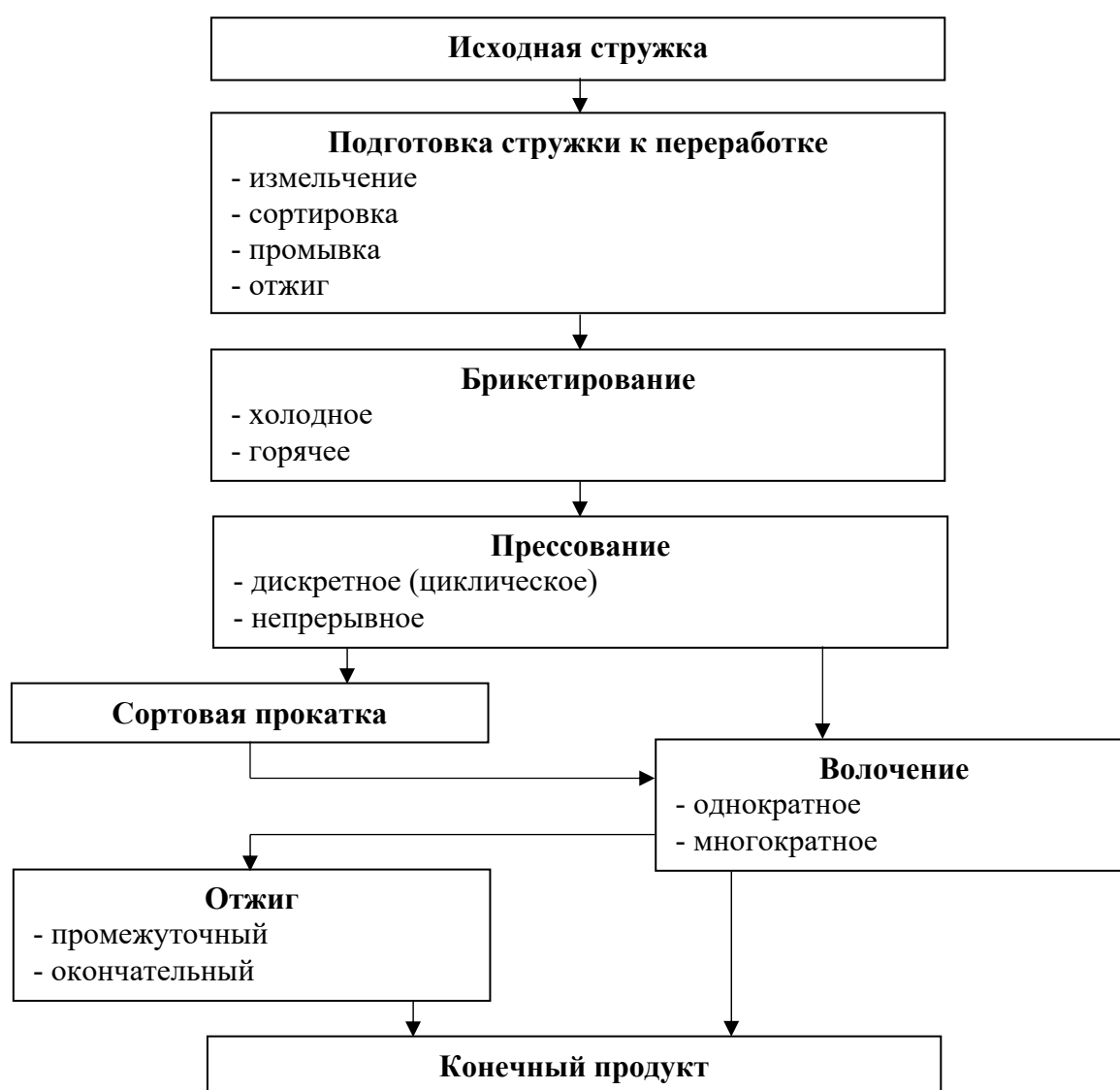


Рисунок 1.5 – Общая технологическая схема получения продукции на основе переработки стружки цветных металлов и сплавов

Каждая из представленных на схеме стадий характеризуется определенными средствами воздействия на те или иные признаки макро- и

микростроения в деформируемом материале, поэтому свой законченный вид она в каждом конкретном случае приобретает только после соответствующей практической апробации. При этом включение в общую схему той или иной технологической операции носит вариативный характер, что обусловлено видом и спецификой обрабатываемого материала, размерами и конфигурацией получаемых изделий, уровнем достигаемых механических свойств и рядом других факторов [34].

1.6 Выводы по главе

1. Одной из важнейших тенденций современной алюминиевой отрасли является возрастающий интерес к максимально эффективному использованию вторичных ресурсов за счет возврата в производственный оборот образующихся в том или ином виде промышленных отходов, значительную долю которых составляет стружка, получаемая в результате механической обработки алюминиевых слитков и полуфабрикатов на различных переделах технологического процесса изготовления металлоизделий.

2. Существующие традиционные технологии переработки вторичного алюминия через его переплав, являясь наиболее рациональным способом переработки крупногабаритного лома и отходов, в случае реализации переплава стружковых отходов неизбежно сталкиваются с проблемами, связанными с повышенным угаром металла, снижением выхода годного, увеличивающимся расходом электроэнергии, возрастающей трудоемкостью, а также решением ряда экологических задач, обусловленных загрязнением окружающей среды.

3. В этой связи актуальной задачей при рассмотрении вопросов переработки алюминиевой стружки является разработка и опробование технологических процессов, основанных на комплексном использовании приемов порошковой металлургии, гранульных технологий и операций ОМД, которые сводят к минимуму недостатки традиционного подхода вследствие полного отказа в этом случае от литейного передела.

4. Для проведения исследований из широкого спектра алюминиевых сплавов были выбраны относящиеся к разным группам деформируемый сплав АД31 и литейный сплав АК12, стружечные отходы которых, получаемые, соответственно, при производстве прессованной продукции и литых дисков автомобильных колес, составляют большую долю в общем объеме поступающего в переработку вторичного сырья на предприятиях Красноярского края.

На основании этих выводов во введении сформулированы и приведены цель и задачи данной диссертационной работы.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНОГО ПРЕССОВАНИЯ ИЗ СТРУЖКИ СПЛАВОВ АД31 И АК12

В соответствии с представленной общей схемой получения продукции на основе переработки стружки цветных металлов и сплавов (рисунок 1.5), в данной главе представлены результаты исследований процесса получения деформированных полуфабрикатов с использованием циклического (дискретного) метода прямого горячего прессования [35]. Основное содержание раздела опубликовано в работах [36–42].

Общая технологическая схема получения прутков и проволоки с использованием горячего прессования брикетов представлена на рисунке 2.1.

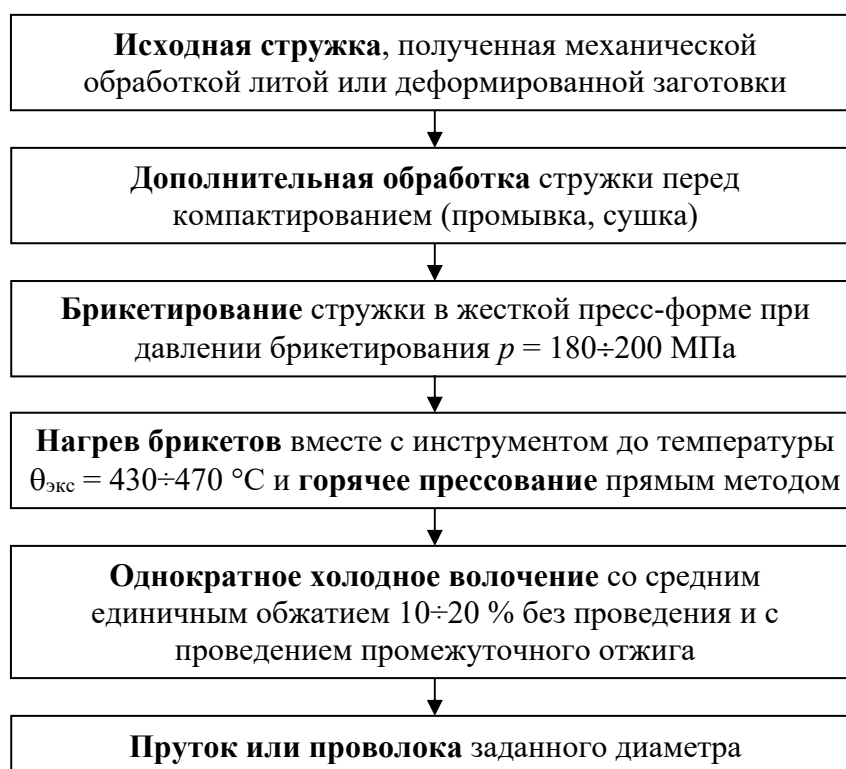


Рисунок 2.1 – Технологическая схема получения деформированных полуфабрикатов с помощью метода дискретного прессования

Данная технологическая схема была использована для изготовления прутков и проволоки из стружки сплавов АД31 и АК12.

2.1 Особенности брикетирования и влияние процесса прессования на свойства полуфабрикатов и изделий из сыпучей стружки сплава АД31

Для решения задачи получения деформированных полуфабрикатов с соответствующим уровнем механических свойств выбрали определенный тип стружки (рисунок 2.2), а для консолидации стружки выполнили следующие операции:

- подготовка элементов пресс-формы к работе и ее сборка;
- заполнение полости пресс-формы стружкой в количестве, необходимом для получения брикета определенной высоты и плотности (в отдельных случаях для этого требуется дополнительная подпрессовка стружки в холодном состоянии небольшим давлением);
- собственно процесс брикетирования с приложением определенного давления и выдержкой при этом давлении в течение нескольких минут;
- извлечение спрессованного брикета из пресс-формы.

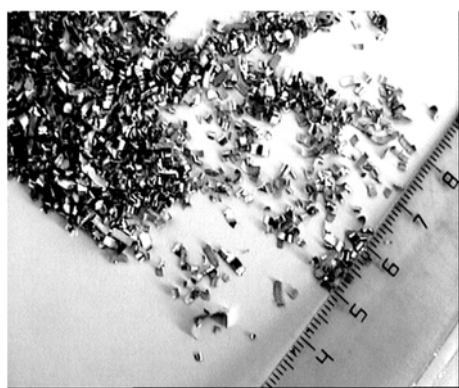
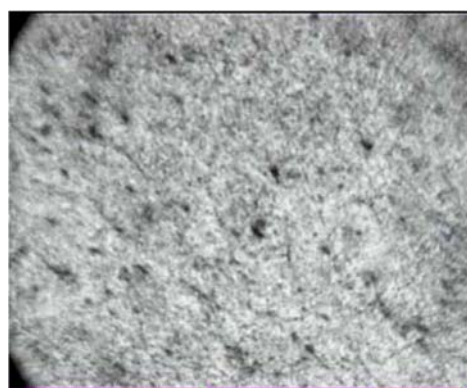
*а**б*

Рисунок 2.2 – Общий вид (а) и микроструктура (б) стружки сплава АД31, x200

Поскольку пригодность стружки как материала для получения различного рода металлоизделий определяется ее прессуемостью, на первом этапе были проведены эксперименты по установлению влияния давления холодного брикетирования на плотность цилиндрических брикетов в зависимости от массы насыпки. Для опытов использовали пресс-форму с канальным отверстием

диаметром 40 мм. Масса насыпки, выбираемая исходя из высоты рабочей зоны контейнера, составляла 80, 100 и 120 г. Усилие подпрессовки для заполнения рабочего пространства пресс-формы порцией стружки определенной массы не превышало 50 кН.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунках 2.3 и 2.4.

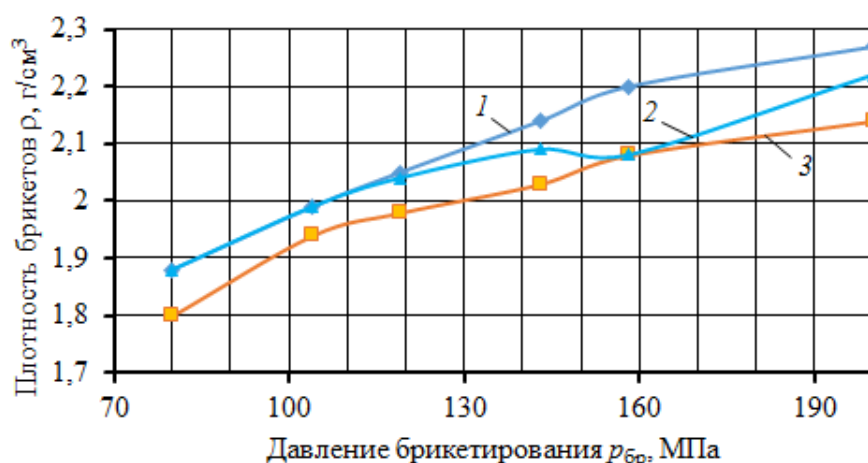


Рисунок 2.3 – Зависимость плотности брикетов ρ от давления холодного брикетирования $p_{бр}$ при различных значениях массы насыпки, г: 1 – 80; 2 – 100; 3 – 120

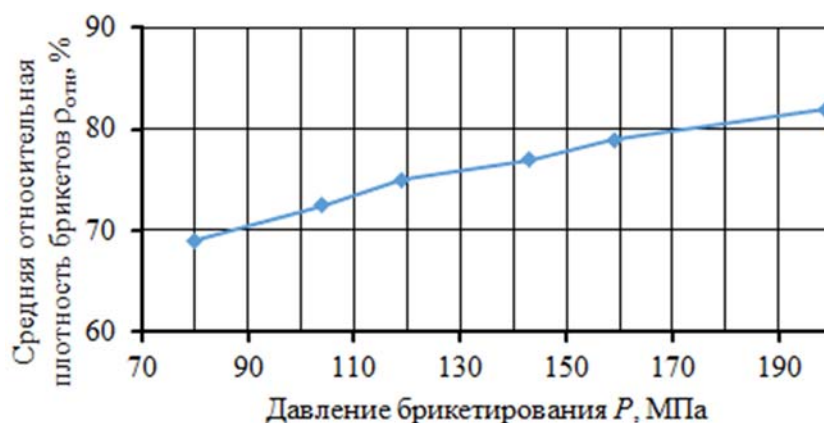


Рисунок 2.4 – Зависимость средней относительной плотности брикетов $\rho_{отн}$ из стружки сплава АД31 от давления холодного брикетирования $p_{бр}$

Характер полученных зависимостей свидетельствует о том, что для достижения минимально необходимого для успешной транспортировки брикета уровня относительной плотности в 60÷70 % нужно приложить давление

брикетирования не ниже $80\div 100$ МПа. При этом чем больше масса насыпки, а следовательно, выше высота получаемого брикета, тем ниже его плотность и существеннее неоднородность ее распределения. Это объясняется увеличением площади контактной поверхности брикета с контейнером, где действуют реактивные силы трения, на преодоление которых расходуется часть давления. В большей степени это проявляется при давлениях брикетирования порядка $160\div 200$ МПа.

Внешний вид полученных при давлении $p_{бр} = 200$ МПа брикетов представлен на рисунке 2.5, из рассмотрения которого также легко заметить, что чем выше брикет, тем он более неоднороден.



Рисунок 2.5 – Внешний вид полученных при давлении $p_{бр} = 200$ МПа брикетов в зависимости от массы засыпаемой стружки

О некотором различии в уровнях плотности сбрикетированных при одном давлении $p_{бр} = 200$ МПа, но при разных значениях массы насыпки m , а следовательно и полученных разных высотах брикетов $h_{бр}$, можно судить по результатам испытаний их на сжатие.

В ходе испытаний регистрировались усилие P_0 , при котором начинала происходить пластическая деформация брикета, а также максимальное усилие $P_{крит}$, при котором брикет разрушался. Далее осуществляли пересчет их в напряжения, условно соответствующие условному пределу текучести σ_T , МПа, и временному сопротивлению разрыва σ_B , МПа. по формулам

$$\sigma_T = \frac{P_0}{F_0}, \quad (2.1)$$

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{P_{\text{крит}}}{F_0}, \quad (2.2)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения исходного брикета, мм².

Площадь поперечного сечения определялась

$$F_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}, \quad (2.3)$$

где d_0 – диаметр исходного брикета, мм.

Кроме того, в опытах фиксировали высоту h_p , соответствующую моменту разрушения, и определяли показатель пластичности материала брикета на сжатие

Λ_p , руководствуясь формулой

$$\Lambda_p = \sqrt{3} \ln \frac{h_0}{h_p}, \quad (2.4)$$

где h_0 – исходная высота брикета, мм.

Зависимости перечисленных выше характеристик от массы сбрикетированных заготовок приведены на рисунках 2.6 и 2.7.

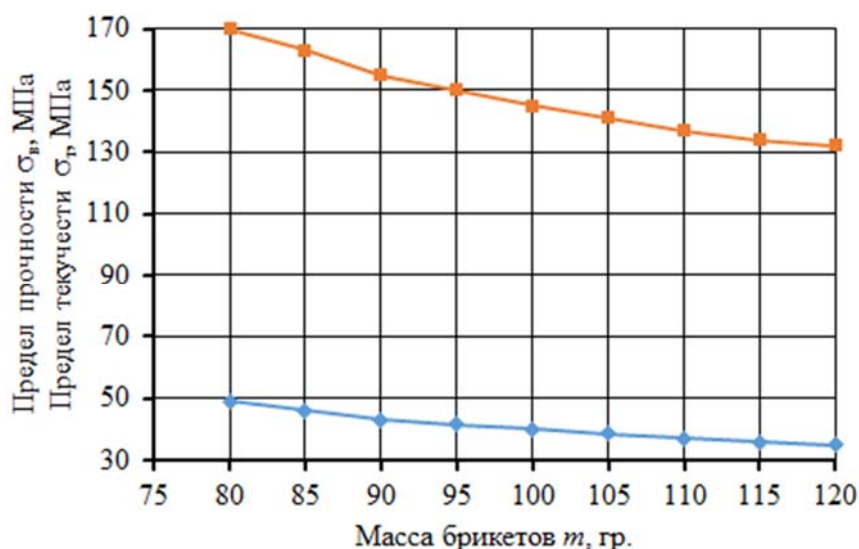


Рисунок 2.6 – Зависимость уровня прочностных характеристик брикетов на сжатие от их массы (высоты после брикетирования)

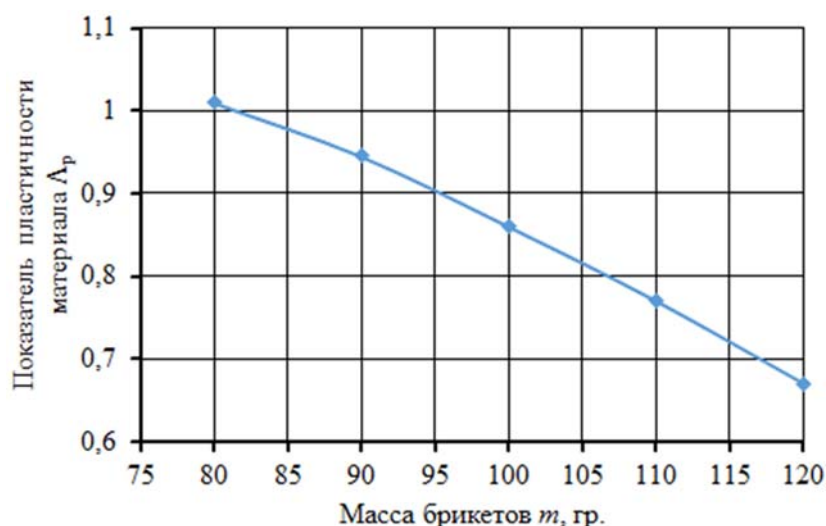


Рисунок 2.7 – Зависимость пластичности брикетов на сжатие от их массы (высоты после брикетирования)

Характер приведенных зависимостей лишний раз подтверждает, что чем больше масса насыпки и высота получаемых брикетов, тем ниже их прочность и способность сохранять устойчивость к внешним силовым воздействиям.

Снижения пористости, а, следовательно, и повышения плотности при тех же значениях давления брикетирования можно добиться, если компактирование стружки проводить в подогретой до определенной температуры пресс-форме. Температура нагрева, соответствующая в данном случае условиям горячего брикетирования, выбирается исходя из того, что сопротивление деформации материала стружки при этой температуре должно быть ниже уровня приложенных давлений брикетирования.

Для подтверждения этого факта были проведены эксперименты по горячему брикетированию той же стружки сплава АД31 в пресс-форме, в одном случае нагретой до температуры 300 ± 20 °С, а в другом – до 400 ± 20 °С. Диаметр рабочего канала пресс-формы составлял 40 мм. Масса засыпаемой в пресс-форму стружки была приблизительно 100 г. Давление горячего брикетирования равнялось 200 МПа. Выдержка при данном давлении бралась равной 5 мин. Интегральная плотность получаемых прессовок составила: при 300 °С – $2,3 \div 2,4$ г/см³, что соответствовало относительной плотности около 85 %, а при 400 °С – $2,5 \div 2,6$ г/см³, что соответствовало относительной плотности около 90 %.

Следующий этап работы включал изучение особенностей осуществления традиционного процесса дискретного прессования полуфабрикатов цилиндрической формы, полученных из брикетированной стружки сплава АД31, на вертикальном гидравлическом прессе, а также определение основных его силовых характеристик.

Чтобы расширить круг потенциально возможных вариантов реализации процесса прессования, к двум способам с предварительным холодным и горячим брикетированием стружки были добавлены еще два – прессование, совмещенное с брикетированием, и прессование подогретой до определенной температуры стружки без акцентированного брикетирования. Таким образом, всего было рассмотрено четыре практически осуществимых варианта, схематично отображенных на рисунке 2.8.

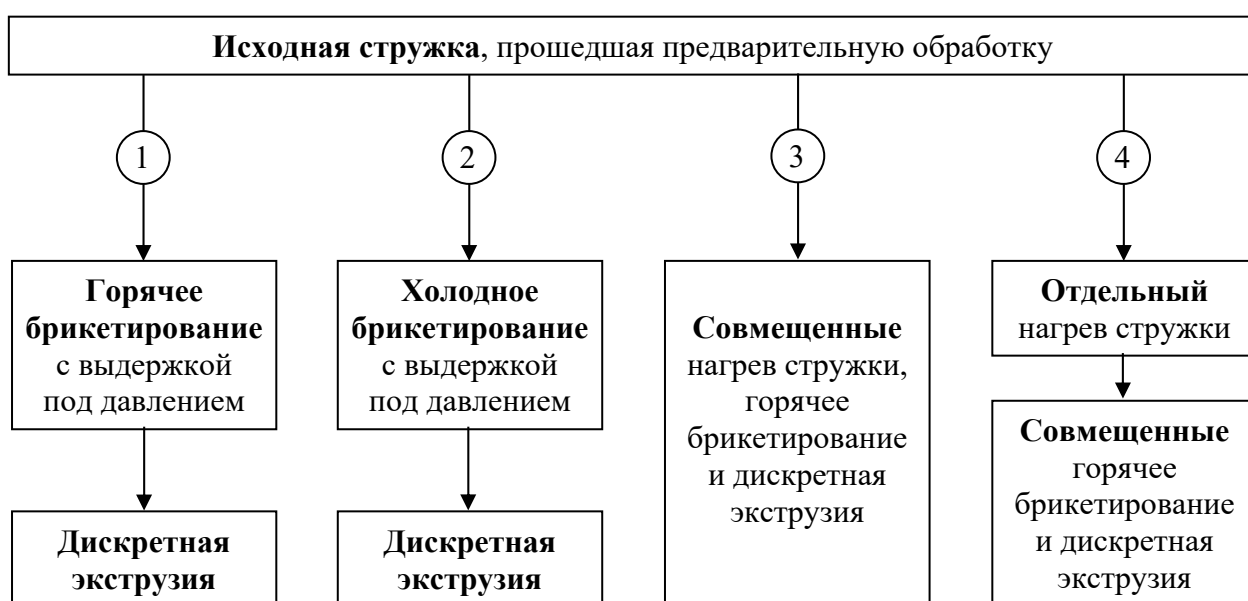


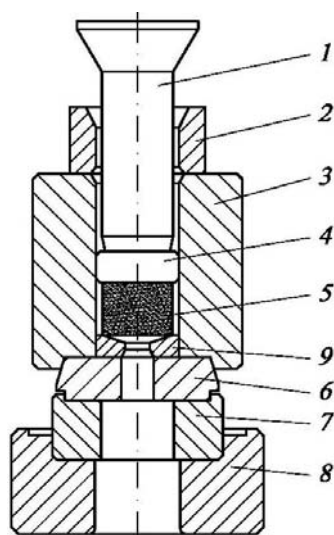
Рисунок 2.8 – Варианты реализации процесса прессования при изготовлении прутков из сыпучей стружки сплава АД31

Температура и скорость деформации, при которых происходило прессование, каждый раз были идентичными и соответствовали параметрам, рекомендуемым для прессования литых заготовок из сплава АД31 [43], т. е. когда

температура заготовки находилась в интервале $\theta = 430 \div 450$ °С, а скорость прессования $v_{\text{пресс}} = 50 \div 150$ мм/с.

Кратко остановимся на особенностях реализации каждого из упомянутых вариантов осуществления процесса прессования.

Учитывая, что при прессовании алюминиевых заготовок перечисленными выше способами можно обеспечить изотермические условия деформирования, т. е. равенство температур нагрева инструмента и деформируемого материала, смазку для снижения влияния контактного трения наносили на рабочую боковую поверхность контейнера до момента помещения в него свободно засыпаемой или брикетированной стружки. Для реализации процесса прессования использовали установку, схема и фотография которой показаны на рисунке 2.9. Она снабжена специальным стационарным нагревательным устройством (на схеме не показано), представляющим собой теплоизоляционный каркас с нагревательным элементом в виде нихромовой спирали. Для поддержания необходимой температуры устройство имеет верхнюю и нижнюю крышки, также изготовленные из теплоизоляционного материала. Размеры внутреннего рабочего пространства печи таковы, что в ней вся установка размещается достаточно свободно.



а



б

Рисунок 2.9 – Схема сборки прессового инструмента (а) и установка (б) для горячего прессования: 1 – пуансон; 2 – ограничитель хода; 3 – контейнер; 4 – пресс-шайба; 5 – заготовка; 6 – подкладка; 7 – матрицедержатель; 8 – основание; 9 – матрица

Методика экспериментальных исследований получения прутков из предварительно скомпактированной стружки заключалась в следующем. Брикет, размещенный внутри контейнера вместе с пуансоном, пресс-шайбой и матрицей, нагревали до температуры порядка $430\div 450$ °С. Далее на вертикальном прессе усилием 1 МН с помощью пуансона и пресс-шайбы проводили распрессовку и выдавливание прутка через калибрующее отверстие матрицы. Величина пресс-остатка составляла $5\div 10$ мм. Далее вместо матрицедержателя с подкладкой устанавливали съемное кольцо и выполняли выпрессовку пресс-остатка вместе с матрицей и полученным профилем. Затем пресс-изделие отделяли от пресс-остатка и охлаждали на воздухе.

Механические свойства прутков, полученных с применением холодного брикетирования составили: временное сопротивление разрыву $\sigma_b = 130\div 140$ МПа, относительное удлинение $\delta = 15\div 17$ %.

Чтобы расширить представление о влиянии на ход процесса прессования коэффициента вытяжки, далее уже этапе из горячебрикетированной заготовки прессованием получали прутки диаметром 6 мм (коэффициент вытяжки μ при этом составлял: $\mu = \frac{D_k^2}{d_{пр}^2} \approx 56$), 8 мм ($\mu \approx 32$) и 12 мм ($\mu \approx 14$).

Установлено, что независимо от того, с каким коэффициентом вытяжки осуществляется прессование, истечение прутков из матрицы по заданному температурно-скоростному режиму происходит достаточно устойчиво. Максимальное усилие прессование составляет порядка 500 кН, что удовлетворительно согласуется с расчетными данными, полученными с использованием формулы И.Л. Перлина [44].

После прессования от прутков по определенной схеме отбирались образцы, на которых изучались механические характеристики материала на сжатие и растяжение. При выборе схемы вырезки образцов учитывалось, что передний и задний концы пресс-изделий представляют собой слабдеформированные участки с недостаточно проработанной структурой.

Оценка материала прутков на сжатие проводилась путем испытания вырезанных из них цилиндрических образцов с соотношением высоты h к диаметру d , близким к единице. Сжатию на плоских полированных бойках универсальной испытательной машины LFM-40 были подвергнуты по три образца, отобранные от каждого из трех прутков диаметрами 6, 8, и 12 мм. Внешний вид образцов до и после испытания, а также образец протокола, фиксирующего ход сжатия, представлены, соответственно, на рисунках 2.10 и 2.11.



Рисунок 2.10 – Вид образцов прутков разного диаметра до и после испытания на сжатие

Протокол испытания

Имя испытания: Zagrov 8mm_Nr2
 Заказчик:
 Материал: Al
 Оператор: Ворошилов
 Примечание:

Дата испытания:

w+b walter+bai ag
 Informations- & Service- Zentrum
 Nr. 44 32387 21 25, Fax 44 32387 21 26

18.11.2014

Описание	Результат
Диаметр	7.88 mm
Начальное сечение	48.77 mm ²

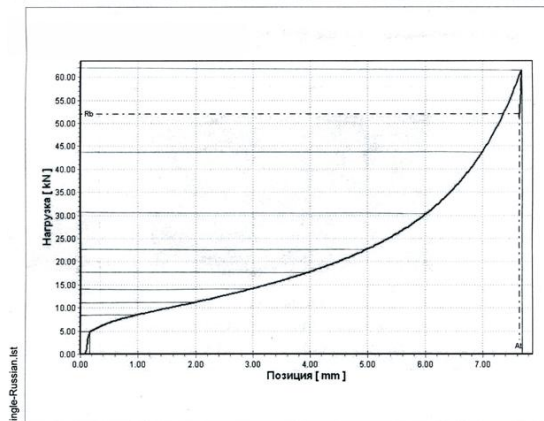


Рисунок 2.11 – Протокол испытания на сжатие цилиндрического образца высотой 10 мм

По результатам обработки полученных протоколов были построены графики, отражающие изменение прочностных характеристик образцов прутков на сжатие в зависимости от сообщаемой им степени деформации сдвига Λ .

Результаты механических испытаний в виде отдельных графиков и обобщенной диаграммы приведены на рисунках 2.12 и 2.13. Анализ данных, приведенных на рисунке 2.12 показал, что непосредственно после горячего прессования наибольшей прочностью обладает пруток диаметром 6 мм, полученный с наиболее высоким коэффициентом вытяжки. По мере развития деформации сжатия сначала происходило некоторое выравнивание уровней прочности испытываемых образцов разного диаметра. Далее, с увеличением Λ выше значений 1,0, изменение прочности материала становилось заметно различимым, причем наибольший ее уровень наблюдался уже у образцов, вырезанных из прутка диаметром 8 мм (рисунок 2.13).

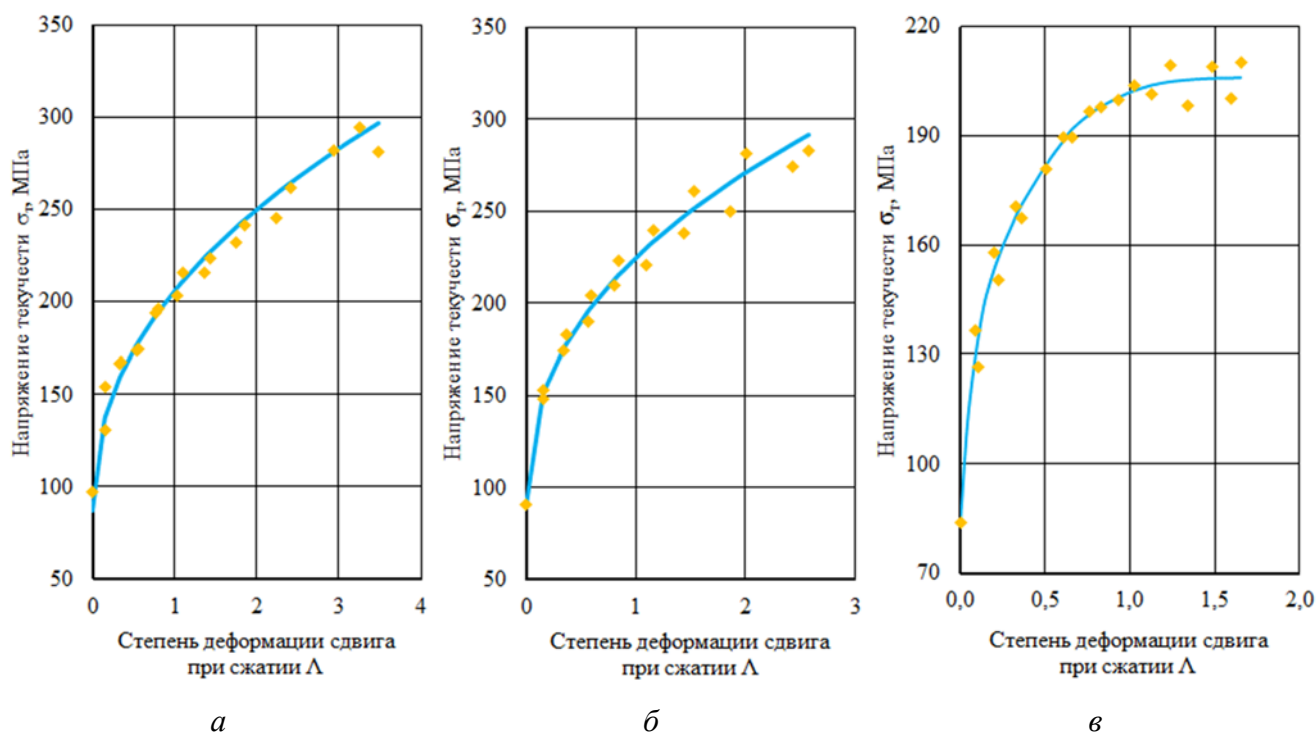


Рисунок 2.12 – Изменение напряжения текучести образцов прутков разного диаметра, полученных горячим прессованием с определенным коэффициентом вытяжки из горячебрикетированной сыпучей стружки сплава АД31, в зависимости от степени деформации сдвига при сжатии: *a* – пруток диаметром 6 мм ($\mu = 56$); *б* – пруток диаметром 8 мм ($\mu = 32$); *в* – пруток диаметром 12 мм ($\mu = 14$)

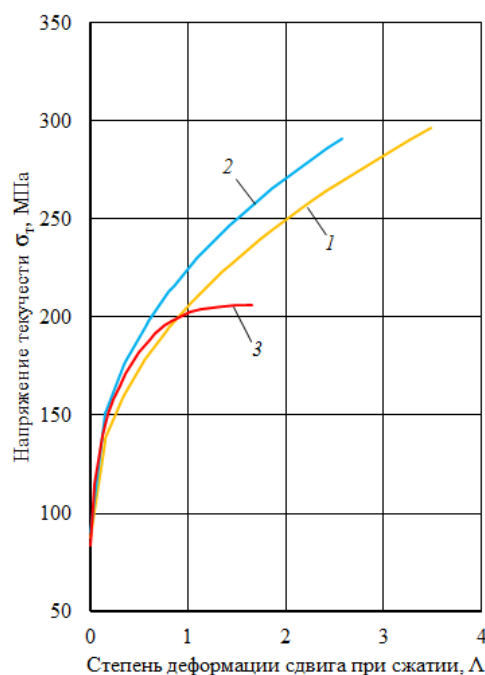


Рисунок 2.13 – Сравнительная диаграмма кривых текучести при сжатии образцов прутков из сыпучей стружки сплава АД31, полученных прессованием с разным коэффициентом вытяжки: 1 – $\mu = 56$ (диаметр 6 мм); 2 – $\mu = 32$ (диаметр 8 мм); 3 – $\mu = 14$ (диаметр 12 мм)

Как уже отмечалось выше, в работе были опробованы и другие варианты реализации процесса прессования (рисунок 2.8), например, те, в которых горячее прессование совмещалось с горячим брикетированием.

Данный способ может осуществляться по двум схемам. В одном случае свободно засыпанную в контейнер стружку нагревали вместе с инструментальной оснасткой (рисунок 2.9) до температуры горячей обработки, составляющей 450 °С. После нагрева производили прессование через матрицу с рабочим отверстием диаметром 6 мм. На начальном этапе ее осуществления происходило брикетирование (уплотнение) стружки до определенного уровня, для достижения которого предварительно перед матрицей размещали заглушку, выполняющую роль нижнего неподвижного пуансона. После того, как прикладываемое к перемещаемому вместе с пресс-шайбой пуансону давление достигало «критических» значений, начиналось истечение металла через матрицу. При этом передний конец выдавливаемого пресс-изделия формировался материалом заглушки.

Другой вариант, позволяющий существенно сократить цикл прессования и уменьшить продолжительность нахождения стружки при высоких температурах, заключался в засыпке в нагретую до температуры горячей обработки пресс-форму уже подогретой до заданной температуры стружки. В результате давление к пресс-штемпелю прикладывали сразу же после помещения стружки в контейнер, при этом дальнейшая последовательность действий ничем не отличается от предыдущего случая.

Эксперименты показали, что при реализации обоих способов течение металла через матрицу идет достаточно устойчиво без видимых расслоений как по длине, так и по сечению пресс-изделия.

Исходя из всего вышеизложенного, можно сделать следующие выводы.

Применительно к переработке сыпучих стружковых отходов сплава АД31 в полуфабрикаты и изделия круглого поперечного сечения, исключаяющей стадию переплава, возможны различные варианты перевода стружки в относительно компактное состояние. Эти варианты, реализующие в своей основе единый принципиальный подход, отличаются по сути только условиями проведения ключевой в предлагаемой схеме технологической операции – прессования. Эти различия связаны, в первую очередь, с тем, в каком виде – свободно засыпанном или сбрикетированном – стружка изначально размещается в контейнере, служащем приемным элементом технологической оснастки под последующее компактирование.

В ходе практического опробования потенциально возможных схем было установлено, что с точки зрения формирования определенного уровня механических характеристик прутково-проволочной продукции принципиальной разницы, проводить ли отдельно предварительное горячее или холодное брикетирование стружки или же засыпать стружку сразу в контейнер и совмещать горячее брикетирование с прессованием, нет. Важно в любом случае обеспечить только заданные температурно-скоростные условия деформации в момент начала истечения металла стружки из рабочего отверстия матрицы.

2.2 Исследование процесса получения прутков из стружки сплава АК12 с использованием схемы дискретного прессования

Для исследования процесса получения деформированных полуфабрикатов из сплава АК12 была выбрана стружка, образующаяся на одном из переделов при производстве литых дисков колес (рисунок 2.14).



Рисунок 2.14 – Общий вид стружки сплава АК12, используемой в работе

Задачей этой части работы являлась разработка технологии получения прутков методами термомеханической обработки стружки за счет использования ресурса пластичности обрабатываемого материала.

Предварительно были проведены эксперименты по холодному брикетированию стружки, результаты которых свидетельствуют о том, что максимальная относительная плотность, которой можно добиться холодным брикетированием стружки давлением порядка 180 МПа, составляет около 70÷75 %. При этом использование давлений брикетирования ниже 100 МПа вообще не позволило достичь плотно связанного состояния. При извлечении скомпактированных при таком давлении брикетов из пресс-формы они рассыпались на отдельные фрагменты.

Снижения пористости, а следовательно, и повышения плотности при тех же значениях давления брикетирования можно добиться, если компактирование стружки проводить в подогретой до определенной температуры пресс-форме. Температура нагрева, соответствующая в данном случае уже условиям горячего

брикетирования, выбирается из тех же соображений, что и ранее, согласно которым сопротивление деформации материала стружки при этой температуре должно быть ниже уровня приложенных давлений брикетирования.

Для подтверждения этого факта были проведены эксперименты по горячему брикетированию той же стружки силумина АК12 при разных температурах брикетирования. Масса навески стружки каждый раз составляла около 100 г. Диаметр контейнера был равен 42 мм. Максимальное прикладываемое давление брикетирования было принято равным 180 МПа, выдержка при этом давлении – 5 мин.

По ходу брикетирования и в конце его определяли величину текущей и конечной интегральной плотности брикетов, значения которых в зависимости от температуры и давления брикетирования приведены на рисунке 2.15. Выявленные зависимости для диапазона температур от 20 до 400 °С имеют практически линейный вид с прослеживанием некоторой тенденции к снижению интенсивности уплотнения с увеличением температуры брикетирования. Максимальная интегральная плотность получаемых брикетов при 400 °С составила $2,35 \div 2,45$ г/см³, что соответствовало относительной плотности около 90 %.

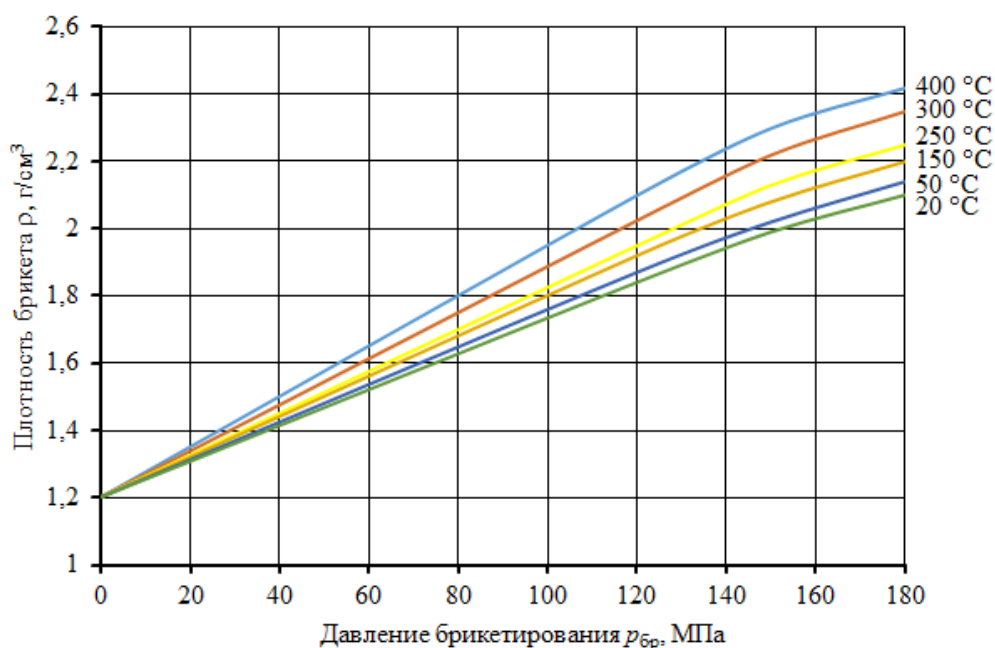


Рисунок 2.15 – Зависимость плотности брикетов ρ от давления брикетирования $p_{бр}$ при различных температурах

Микроструктура брикетов, полученных при температуре нагрева пресс-формы 400 °С и давлении брикетирования 180 МПа, приведена на рисунке 2.16, показывает, что свойства материала, скомпактированного по описанной выше схеме, обусловлены тем, что составляющие его фрагменты упакованы почти без зазоров, но при этом находятся лишь в механическом соприкосновении и сцеплении друг с другом. В самой структуре прослеживается эвтектика ($\alpha + \text{Si}$) и α -твердый раствор на базе алюминия.

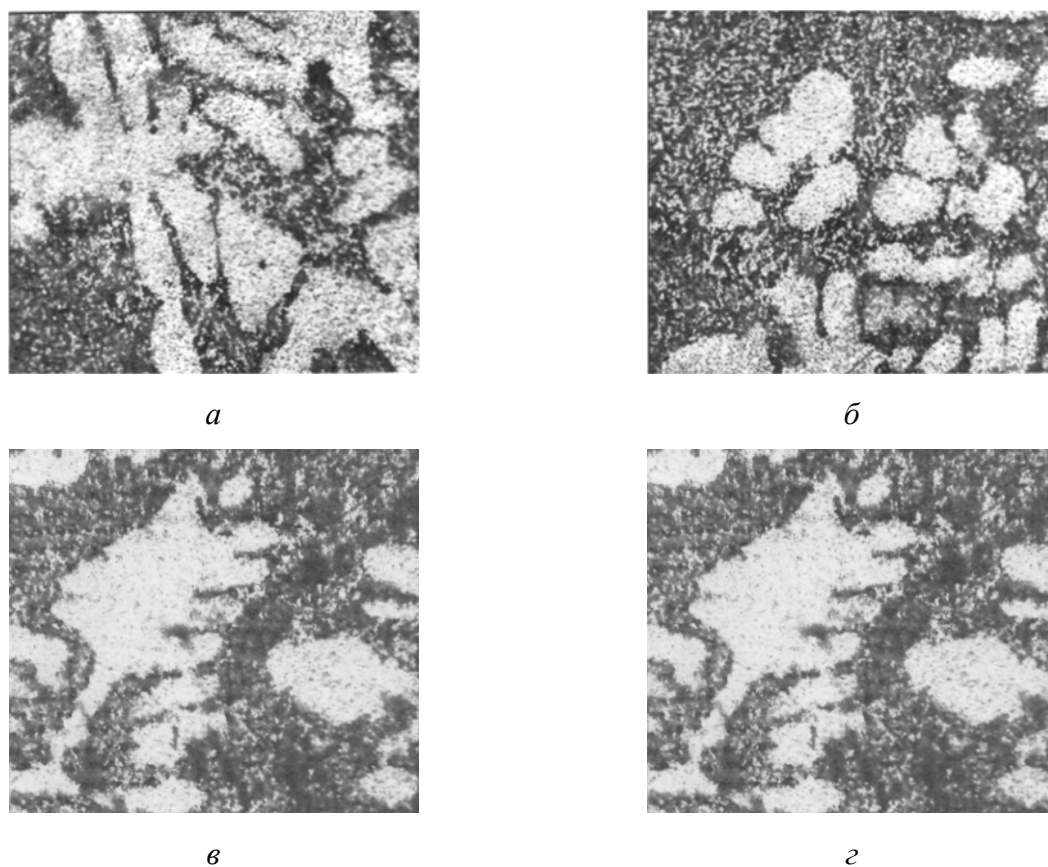


Рисунок 2.16 – Микроструктура сбрикетированных образцов из сплава АК12, $\times 420$

Дополнительным подтверждением достаточно низкого уровня прочностных характеристик цилиндрических прессовок из стружки силумина, полученных горячим брикетированием, послужили результаты испытаний их на сжатие в холодном состоянии. Образцы высотой $h_0 = 31 \div 33$ мм и диаметром $D_0 = 42$ мм подвергали сжатию на гладких полированных бойках с фиксированием:

– усилия P_0 , соответствующего началу пластического течения;

- усилия в момент разрушения образца P_p ;
- высоты в момент разрушения образца h_p .

Далее с использованием формул (2.1)–(2.4), рассчитывались условный предел текучести σ_T , временное сопротивление разрыву на сжатие σ_B , степень деформации сдвига в момент разрушения Λ_p .

По результатам сжатия трех образцов брикетов, полученных в идентичных условиях, были определены диапазоны изменения указанных выше величин, которые составили: $\sigma_T = 120 \div 130$ МПа; $\sigma_B = 140 \div 150$ МПа; $\Lambda_p = 0,15 \div 0,20$. Приведенные значения свидетельствуют о том, что уровень механических характеристик заготовок из стружки силумина рассмотренной марки после горячего брикетирования остается достаточно низким, поэтому для дальнейшего практического применения их использование не целесообразно.

Следующий этап работы включал изучение особенностей реализации традиционного процесса прессования брикетов цилиндрической формы, полученных из стружки силумина АК12 на вертикальном гидравлическом прессе. Температурно-скоростной режим осуществления данной операции соответствовал параметрам, рекомендуемым для прессования прутков из труднодеформируемых алюминиевых сплавов [43]: температура нагрева заготовки $\theta = 450 \div 470$ °С, скорость прессования $v_{пр} = 50 \div 150$ мм/с.

На рисунке 2.17 приведены характерные структуры полученных с разными значениями коэффициента вытяжки прутков диаметром 6 и 8 мм соответственно. Структура прутков в продольном сечении строчечная, т. е. светлые вытянутые в направлении истечения из матрицы участки алюминиевой фазы перемежаются с более темными областями, насыщенными кремнием. При этом концентрация, размер частиц кремния и порядок их распределения на фоне алюминиевой фазы носят сравнительно неоднородный характер.

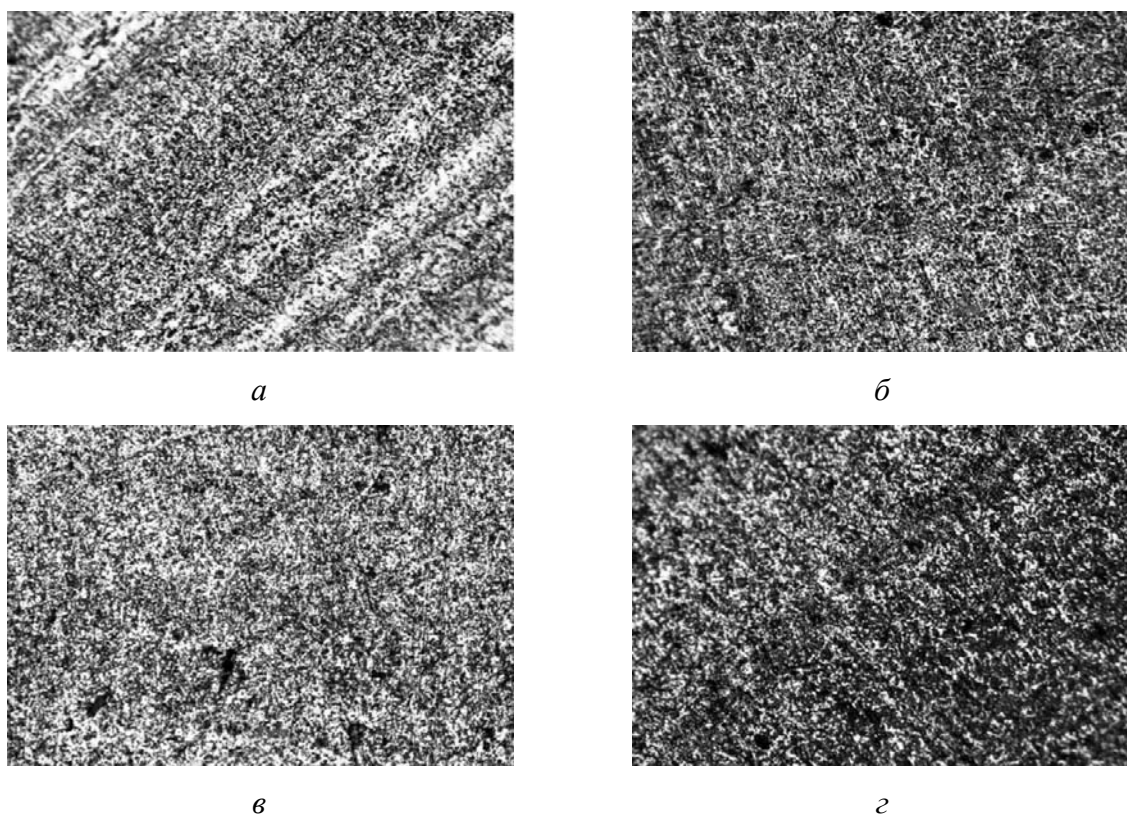


Рисунок 2.17 – Характерные микроструктуры прутков диаметром 6 и 8 мм в продольном (*а, в*) и поперечном (*б, г*) сечениях, $\times 320$: *а, б* – диаметр 6 мм; *в, г* – диаметр 8 мм

Сравнительный анализ достигнутых механических характеристик показал, что на начальном этапе независимо от диаметра получаемого горячим прессованием прутка средние значения рассматриваемых показателей прочностных и пластических свойств материала мало отличаются друг от друга. Диапазон изменения значений временного сопротивления разрыву σ_B составляет от 160 до 170 МПа, относительного удлинения δ – от 15 до 20 %, относительного сужения ψ – от 30 до 40 %.

2.3 Выводы по главе

1. В ходе проведения практической апробации предлагаемой схемы переработки стружковых отходов сплавов АД31 и АК12 с использованием метода дискретного прессования установлено, что перевод стружки в относительно компактное состояние рациональнее проводить путем холодного брикетирования.

В этом случае исключается дополнительное окисление поверхности частиц стружки, а уровень достигаемой относительной плотности при давлении брикетирования 200 МПа составляет для стружки сплава АД31 порядка 80÷85 %, а для стружки сплава АК12 при давлении 180 МПа – 70÷75 %. При этом с целью повышения плотности брикетов, особенно для второго случая, есть смысл применять горячее брикетирования при температуре 300÷400 °С, позволяющее при тех же давлениях брикетирования достигать относительной плотности 90 %.

2. Влияние реализуемого температурного режима брикетирования в сочетании с различными условиями осуществления процесса дискретного прессования было проанализировано применительно к получению прутков из стружки сплава АД31. Установлено, что с точки зрения формирования определенного уровня механических характеристик прутков принципиальной разницы между опробованными схемами комбинирования процессов брикетирования и прессования нет. Важно в любом случае обеспечить заданные температурно-скоростные условия деформации в момент начала истечения металла из рабочего отверстия матрицы.

3. При принятых в работе температурно-скоростных режимах горячего прессования: для сплава АД31 температура деформации $\theta = 430\div 450$ °С, для сплава АК12 $\theta = 450\div 470$ °С и скорости деформации $\xi = 1,5$ с⁻¹, прочностные и пластические свойства независимо от диаметра получаемого прутка мало отличаются друг от друга. Диапазон изменения значений для сплава АД31 составляет: временное сопротивление разрыву $\sigma_b = 130\div 140$ МПа, относительное удлинение $\delta = 15\div 17$ %, для сплава АК12 – $\sigma_b = 160\div 170$ МПа, $\delta = 13\div 15$ %.

4. Анализ микроструктур прутков разного диаметра из сплава АК12 показал, что схватывание частиц стружки в процессе деформации не происходит, структура в продольном сечении строчечная, т. е. светлые вытянутые в направлении истечения из матрицы участки алюминиевой фазы перемежаются с более темными областями, насыщенными кремнием. При этом концентрация,

размер частиц кремния и порядок их распределения на фоне алюминиевой фазы носят сравнительно неоднородный характер

5. Дополнительно проведенные испытания прутков из стружки сплава АД31 на сжатие показали, что непосредственно после горячего прессования наибольшей прочностью обладает пруток диаметром 6 мм, полученный с наиболее высоким коэффициентом вытяжки. По мере развития деформации сжатия сначала происходило некоторое выравнивание уровней прочности испытываемых образцов разного диаметра. Далее, с увеличением степени деформации сдвига выше значений 1,0, изменение прочности материала становилось заметно различным, причем наибольший ее уровень наблюдался уже у образцов, вырезанных из прутка диаметром 8 мм.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ СЫПУЧЕЙ СТРУЖКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Недостатком традиционного метода прессования, в том числе и при использовании заготовок, полученных брикетированием стружковых сыпучих отходов, является ограниченная ее длина, что обуславливает повышенную цикличность производства, включающего большое количество вспомогательных операций. Существующие методы непрерывного прессования, например метод CONFORM, реализующий технологию выдавливания через матрицу материала заготовки, нагнетаемого ручьем, выполненным в поверхности валка, устраняют этот недостаток. Такой метод подвергался анализу в различных публикациях, например [45]. Некоторые отечественные методы непрерывного прессования разрабатывались в Уральском федеральном университете [46–48] на основе идеи совмещения с непрерывной разливкой и циклическим перехватом заготовки проталкивающим устройством, а также в Сибирском федеральном университете с применением, в том числе идеи вращения прессующего инструмента [49–51]. Отмечалось, что дополнительным преимуществом непрерывного прессования является экономия энергетических затрат [52].

В качестве метода непрерывного прессования использовали совмещенную прокатку-прессование (СПП) [50], имеющую ряд преимуществ по сравнению с методом CONFORM в плане снижения неравномерности деформации и энергосиловых параметров процесса.

В работах [36, 53–59] опубликованы методика, оборудование и результаты экспериментальных исследований и моделирования процесса получения прутков из исследуемых сплавов методом СПП.

Общая технологическая схема получения прутков и проволоки с использованием метода совмещенной прокатки-прессования брикетов представлена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Технологическая схема получения деформированных полуфабрикатов с помощью метода непрерывного прессования

Основными операциями, обеспечивающими получение полуфабрикатов из стружки сплавов АД31 и АК21 являются: брикетирование, совмещенная прокатка-прессование, промежуточный отжиг и холодное волочение.

3.1 Моделирование уплотнения пористого материала и исследование зон неконтактной деформации при совмещенной прокатке-прессовании

Одной из задач исследования являлось изучение параметров, сопровождающих процесс СПП при использовании пористой среды в качестве исходного материала. Применение пористой среды обусловлено необходимостью

переработки порошков, гранул, стружки и других сыпучих материалов. На первом этапе обработки обычно используют первичный метод деформации: уплотнение сыпучей среды до состояния заготовки, способной сохранять форму. Следующий этап заключается в прессовании пористой заготовки с получением изделия заданного поперечного сечения. Схема процесса СПП приведена на рисунке 3.2, *а*. Заготовка *1* поступает в калибр, образованный двумя валками *2*. На пути ее перемещения установлена матрица *3*. Под действием напряжений трения, создаваемых валками, заготовка продавливается в отверстие матрицы с получением готового изделия. На рисунке 3.2, *б* показано формоизменение заготовки по мере прохождения ею очага деформации.

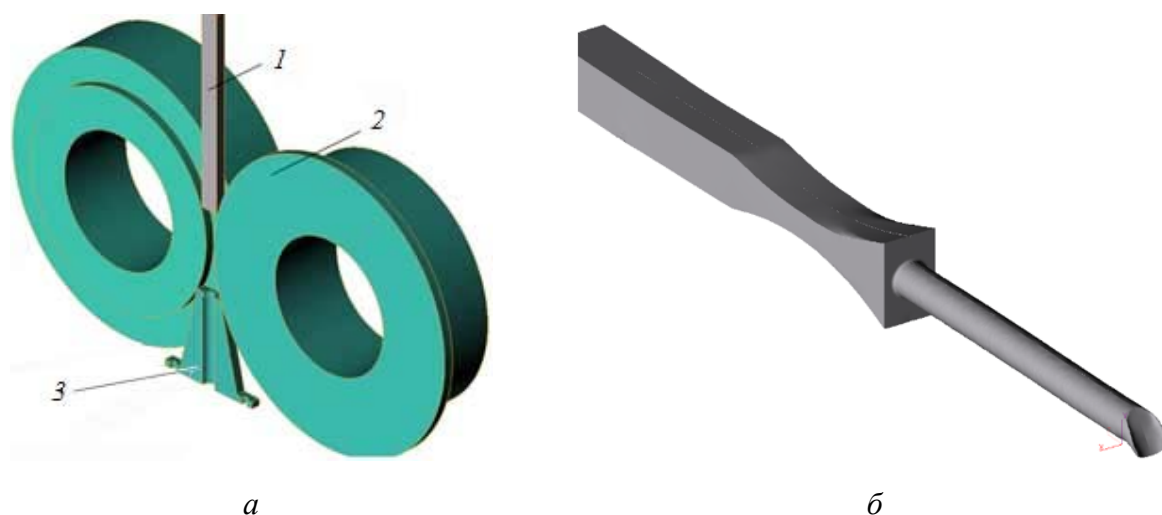


Рисунок 3.2 – Схема процесса СПП (*а*) и профиль заготовки внутри очага деформации (*б*):
1 – заготовка; *2* – валки; *3* – матрица (показана половина очага деформации)

Для решения задачи приняты следующие параметры и граничные условия. Катающие радиусы $R_1 = 53,5$ мм и $R_2 = 40,5$ мм. Ширина калибра $b = 15$ мм, минимальный зазор между валками $h_1 = 7$ мм, высота зеркала матрицы $h_{з.м} = 22$ мм, диаметр прессуемого прутка $d_{изд} = 9$ мм, длина калибрующего пояса матрицы $L_{п} = 2$ мм, угол зеркала матрицы $\theta = 90^\circ$, начальная высота заготовки $h_0 = 14$ мм, ширина $b_0 = 14$ мм.

Математическое моделирование процесса выполняли в программе QFORM V8 в 3D-постановке с наличием одной плоскости симметрии. Процесс

представляет собой одну операцию деформирования заготовки с учетом теплообмена между заготовкой и инструментом, а также между заготовкой и окружающей средой. Материал заготовки – алюминиевый сплав АД31, механические свойства заимствованы из базы данных программы QFORM V8. Заданы следующие параметры: плотность материала 2730 кг/м^3 , теплопроводность 130 Вт/(м·К) , теплоемкость 960 Дж/(кг·К) . Кривые упрочнения сплава АД31 построены для диапазона температур $300 \div 550 \text{ °C}$, степеней деформации $0,04 \div 4,00$ и скоростей деформации $0,01 \div 5,00 \text{ с}^{-1}$ (рисунок 3.3).

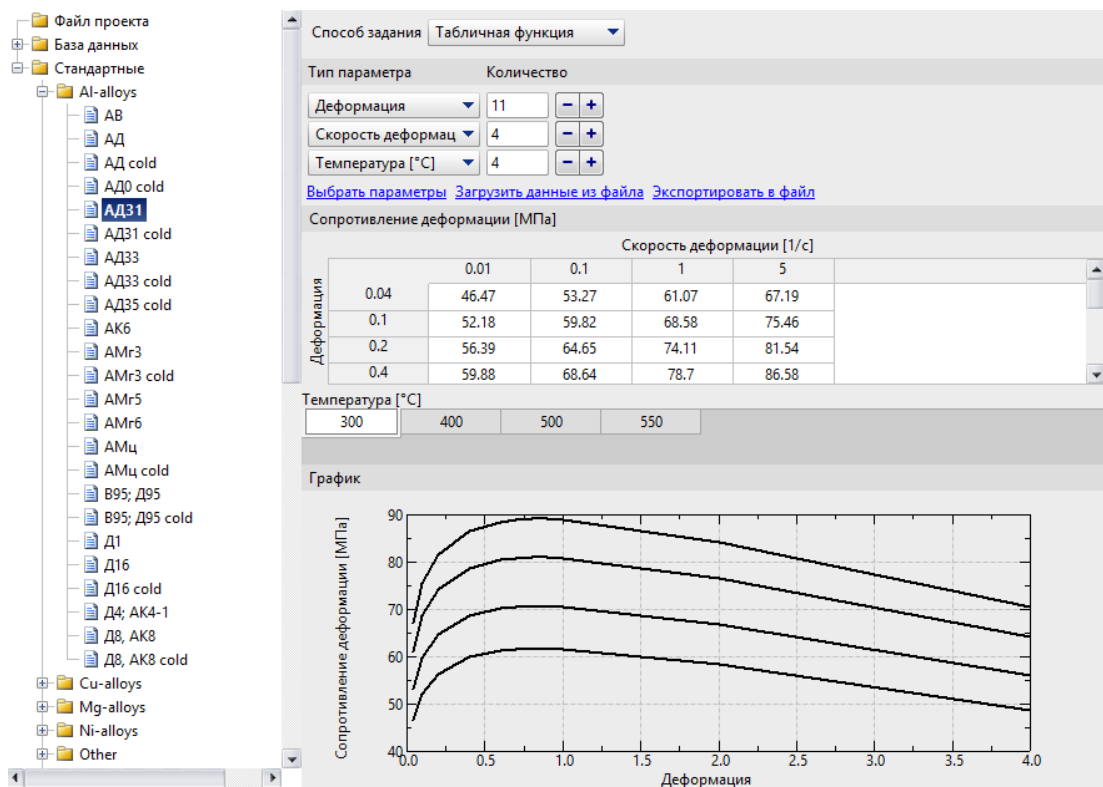


Рисунок 3.3 – Окно программы для выбора свойств сплава

Для этого материала склонность к разупрочнению наблюдается при достижении степени деформации $0,70 \div 0,80$ для всех диапазонов температур и скоростей деформации. Исходная температура заготовки 450 °C (без учета охлаждения заготовки при переносе от печи к стану).

В данном варианте постановки задачи инструмент принят как жесткое недеформируемое тело. Частота вращения валков задана равной 10 мин^{-1} . В

качестве смазки выбран материал с показателем трения 0,8 (для всех поверхностей) и коэффициентом теплопередачи (при контакте заготовки и инструментов) 100 тыс. Вт/(м²·К). Исходная температура инструмента 200 °С.

В качестве дополнительных граничных условиях заданы: параметры взаимодействия с окружающей средой (температура 20 °С, степень черноты 0,6 и коэффициент теплоотдачи 30 Вт/м²·К); скорость подачи заготовки в валки – 5 мм/с, которая действительна до момента захвата заготовки валками. Как дополнительный параметр задан постоянный шаг по времени 5 с. В данной постановке расчет проведен без учета массы заготовки и действия сил инерции.

На рисунке 3.4 даны результаты расчета кинематики процесса в виде проекций вектора скорости на оси Z и Y .

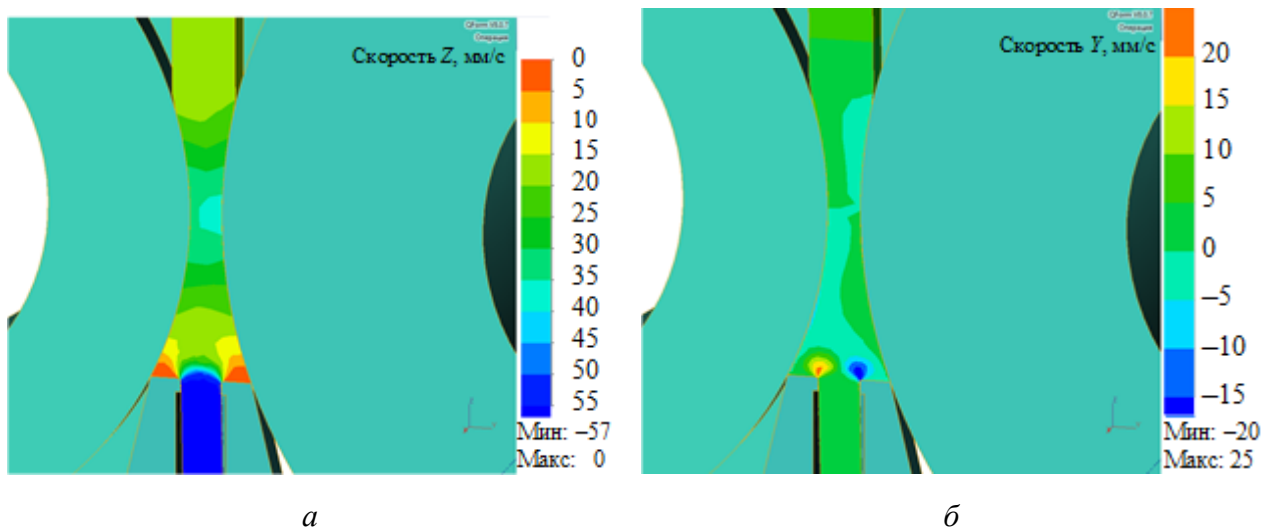


Рисунок 3.4 – Скорости перемещения металла: a – осевая компонента v_z вектора скорости; $б$ – поперечная компонента v_y (направлена вдоль валка в плоскости, соединяющей оси)

Можно отметить нарастание компоненты скорости v_z (рисунок 3.4, a) по мере втягивания заготовки в очаг деформации. Однако после пересечения плоскости, соединяющей оси валков, наблюдается обратная картина: скорость уменьшается, а затем начинает расти. Резкое нарастание скорости происходит вблизи отверстия матрицы. При этом в месте примыкания матрицы к валкам наблюдается появление мертвой зоны. Несимметричность картины распределения

компоненты скорости v_y (рисунок 3.4, б) объясняется разницей диаметров валков и несимметричным выполнением ручьев калибра.

Для дальнейшего анализа важным вопросом является распределение температуры (рисунок 3.5, а). При соприкосновении с более холодным инструментом быстро снижается температура заготовки, что объясняется ее малыми поперечными размерами и значительной разностью между температурами заготовки и валков. Положительный эффект от такого воздействия может заключаться в том, что осуществляется переход от горячей деформации к теплой. При этом металл заготовки не рекристаллизуется и, следовательно, не теряет прочность, достигнутую в результате нагартовки. Такой прием часто используется при прессовании алюминиевых сплавов [60].

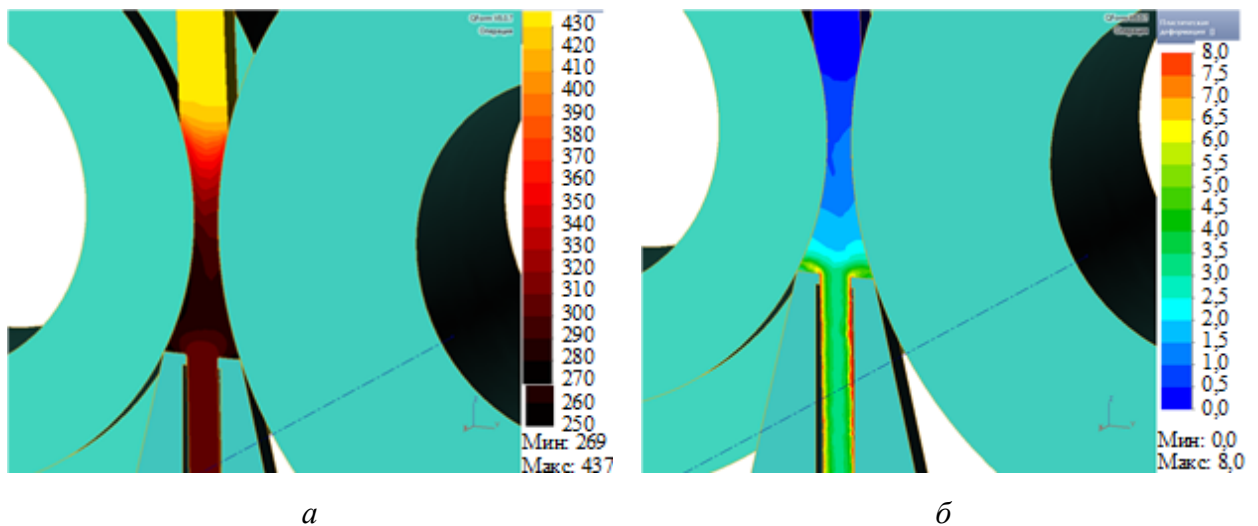


Рисунок 3.5 – Распределение температуры в заготовке (а) при прохождении очага деформации и величины степени деформации (б)

Приведенное на рисунке 3.5, б распределение степени деформации показывает постепенное увеличение этого параметра, начиная от входа заготовки в валки с резким возрастанием вблизи поверхности матрицы. На входе в очаг деформации распределение степени деформации несимметрично: бóльшую степень деформации получают слои, примыкающие к валку большего катающего диаметра.

В расчетном примере в отпрессованной заготовке степень деформации изменяется в диапазоне от 3 до 8, причем максимум деформации наблюдается на периферии, а минимум – в центре заготовки. В практике прессования это объясняется действием напряжений трения на инструменте и локализацией сдвигов вблизи мертвых зон. Из графиков зависимости величины момента вращения валков от перемещения (рисунок 3.6) видно, что момент вращения валка с бóльшим катающим диаметром (выступом) меньше, чем валка с меньшим диаметром (канавкой).

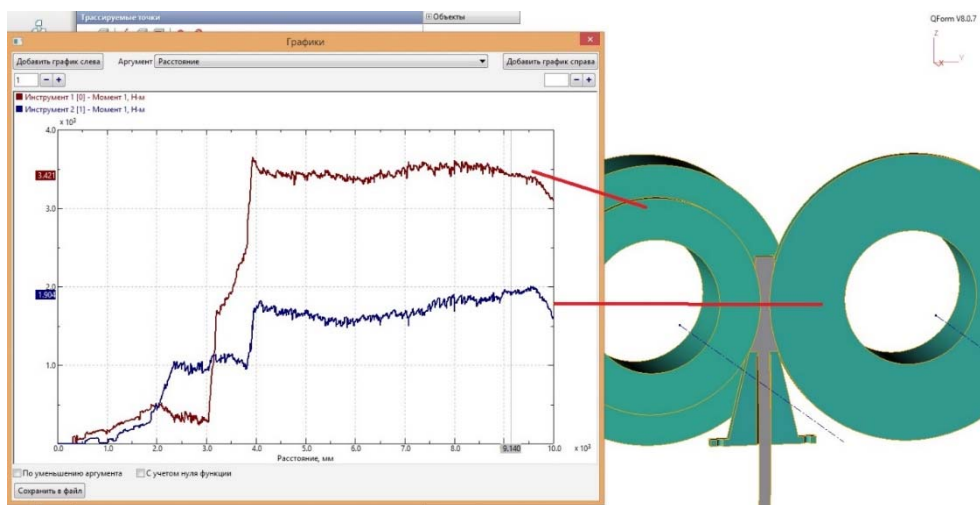


Рисунок 3.6 – Графики зависимости момента прокатки на валках от перемещения:
верхняя кривая для валка с меньшим катающим радиусом

Объясняется это тем, что у валка с канавкой контактная площадь с обрабатываемым металлом больше чем у валка с выступом, поэтому больше трение, сила и момент прокатки.

Величина относительной плотности введена как отношение текущей плотности к плотности компактного материала. Соответственно, начальная относительная плотность при исходной плотности $2\,050\text{ кг/м}^3$ равна 75 %. Из распределения относительной плотности материала заготовки видно (рисунок 3.7), что процесс уплотнения начинается сразу же на входе в очаг деформации, причем этот процесс несимметричен: на валке бóльшего диаметра процесс начинается раньше.

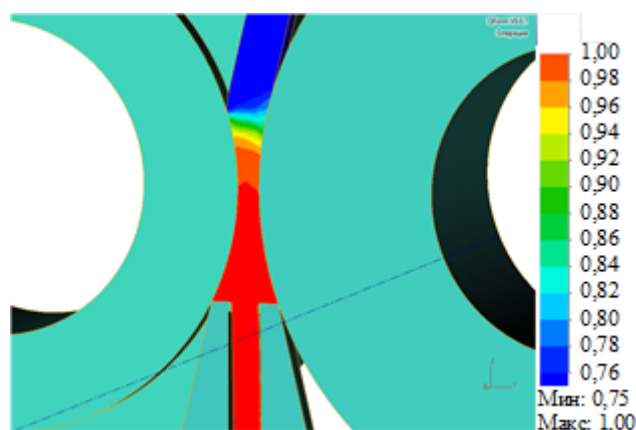


Рисунок 3.7 – Распределение относительной плотности в процессе СПП

Однако по мере продвижения металла по ходу прокатки-прессования большее уплотнение получают уже слои металла, примыкающие к валку меньшего диаметра. При подходе металла к матрице наибольшая плотность наблюдается ближе к центру заготовки. В плоскости, соединяющей оси валков, процесс уплотнения практически заканчивается, и в зону прессования поступает компактный материал, относительная плотность которого близка к 100 %, т. е. к 2730 кг/м^3 . При дальнейшем продвижении металла эта плотность уже не изменяется.

Проведенное математическое моделирование процесса СПП [57] позволило подобрать необходимые параметры и осуществить практическое опробование процесса обработки давлением пористых заготовок из алюминиевых сплавов на полупромышленной установке, что подробно описано ниже.

Одним из явлений, сопровождающих процесс прессования, в том числе и при реализации способа СПП, является возникновение зон неконтактной деформации, т. е. областей очага деформации, в которых металл по тем или иным причинам не соприкасается с инструментом. В этом случае говорят о наличии свободной поверхности, на которую не действуют напряжения всестороннего сжатия. Это обуславливает вероятность появления трещин в этих зонах. Если далее по траектории перемещения металла возникают зоны с действием напряжений всестороннего сжатия, возможно частичное залечивание такого рода дефектов.

При неблагоприятных условиях дальнейшей обработки или эксплуатации указанные дефекты способны раскрываться, вызывая опасность поломки детали. Примером возникновения неконтактных зон является нестационарная начальная стадия прессования, связанная с заполнением контейнера металлом [61, 62]. Часть объема очага деформации может оказаться незаполненной металлом с захлапыванием в некоторых зонах воздуха или смазки и дальнейшим их проникновением в пресс-изделие, что приводит к появлениям пузырей и других нарушений сплошности [63–65]. При малых значениях коэффициента вытяжки контейнер может не заполняться полностью металлом в течение стационарной стадии прессования, поскольку энергетически металлу будет выгоднее выдавливаться через отверстие матрицы, что отмечается в статье [46]. При обычном прессовании часть поверхности заготовки, не соприкасающаяся с прессовым инструментом, может возникать вблизи мертвых (застойных, жестких) зон около зеркала матрицы или вблизи поверхности иглы при прессовании полых заготовок.

С помощью моделирования был проведен анализ возможности возникновения таких зон в процессе совмещенной прокатки-прессования (рисунок 3.8). Для решения задачи параметры и граничные условия заданы в виде, принятом при анализе возможности возникновения зон неконтактной деформации.

На рисунке 3.8 показано распределение средних напряжений в очаге деформации при рассмотрении поверхности контакта деформируемого металла и вала с выступом.

При попадании деформируемого материала в зону калибра между двумя валками наблюдается появление области, в которой происходит уменьшение средних напряжений до уровня по модулю около $|-20|$ МПа. Для сравнения максимальные по модулю средние напряжения в очаге деформации равны $|-550|$ МПа и наблюдаются в жестких зонах у зеркала матрицы.

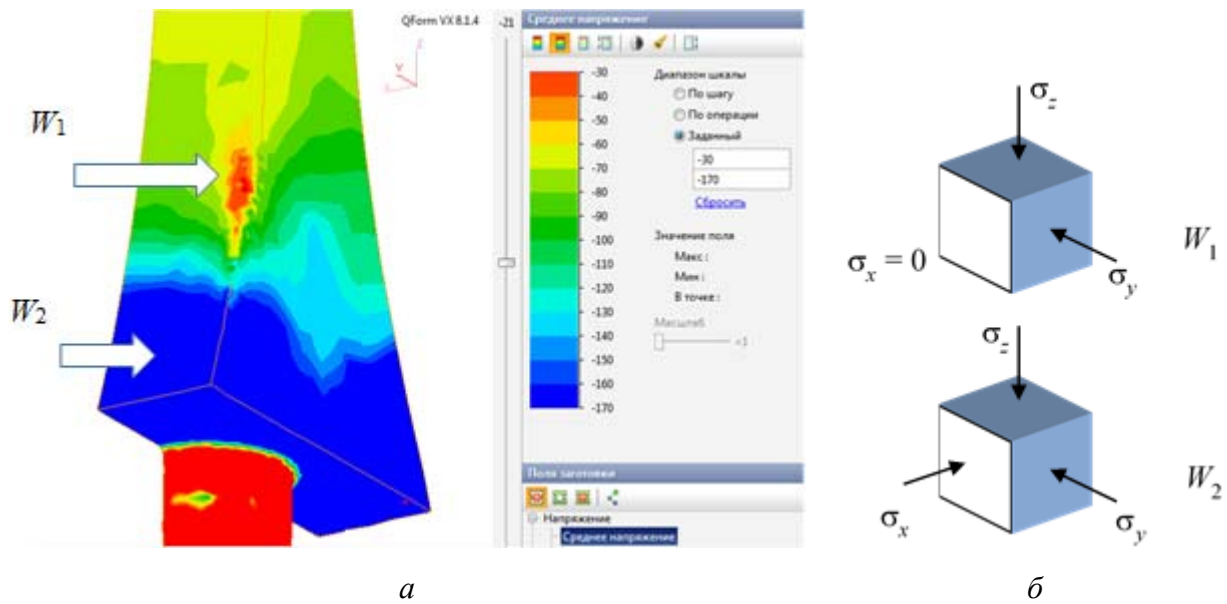


Рисунок 3.8 – Очаг деформации в изометрии (вид со стороны контакта металла и вала с выступом) с отображением поля средних напряжений (а) и соответствие схемы напряженного состояния зонам W_1 и W_2 (б)

Следует отметить, что средние напряжения рассчитываются алгебраически (т. е. с учетом знаков) как средние арифметические величины диагональных компонент тензора напряжений. В декартовой системе координат XYZ среднее напряжение равно

$$\sigma = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) / 3, \quad (3.1)$$

где σ с подстрочными индексами представляют собой соответствующие компоненты тензора напряжений.

Из решения задачи (рисунок 3.8) видно, что в зоне, обозначенной как W_1 , контакт с валком пропадает. Таким образом, соответствующее напряжение σ_{xx} становится равным нулю. Эта ситуация отражена на рисунке 3.8, б, где показаны элементарные объемы, вырезанные в очаге деформации. Естественно, что в зоне W_1 из-за потери слагаемого сумма напряжений по модулю уменьшается, соответственно снижается по модулю и среднее напряжение. Вместо трехосного сжатия происходит двухосное сжатие, по третьей оси сжимающее напряжение отсутствует.

Для сравнения показано, что в зоне W_2 контакт металла с поверхностью вала восстановился, в результате чего возникло сжимающее напряжение σ_{xx} , которое повысило уровень среднего напряжения по модулю до значения $|-200|$ МПа. Таким образом, выявлена зона отхода металла от поверхности валков со стороны вала с гребнем. Дальнейший анализ касался проверки, имеется ли такая зона на контакте с валком с канавкой. На рисунке 3.9 показано распределение средних напряжений для этого случая.

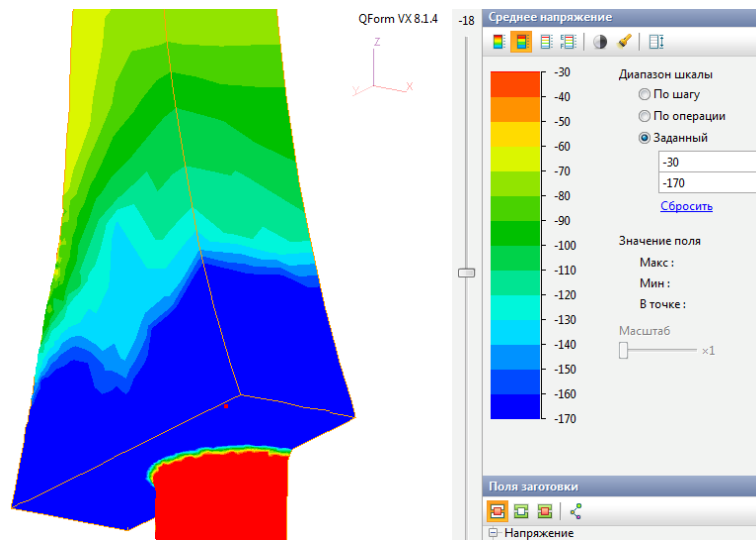


Рисунок 3.9 – Очаг деформации в изометрии (вид со стороны контакта металла с валком с канавкой) и поле средних напряжений

При этом отсутствует нарушение контакта металла с валками, а также зоны уменьшения средних напряжений, а сами напряжения имеют тенденцию к непрерывному росту по модулю в направлении выхода металла из очага деформации. Величина относительной плотности материала заготовки в данном случае равна 0,75 (рисунок 3.10).

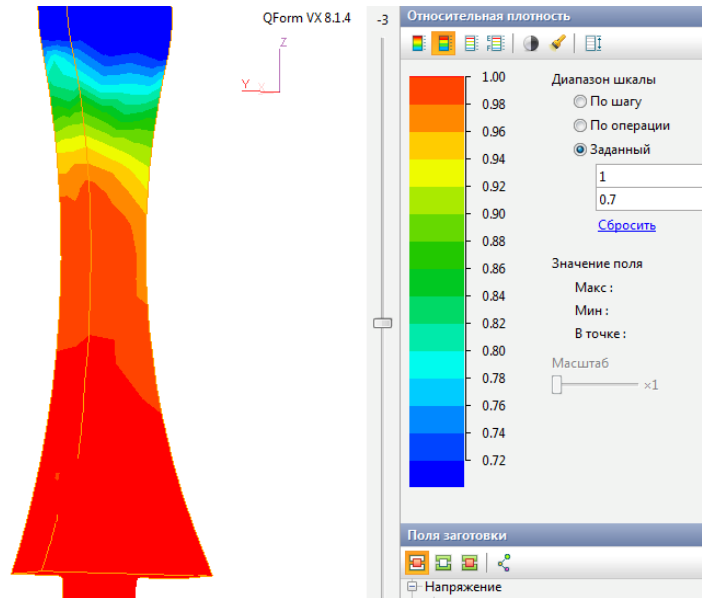


Рисунок 3.10 – Распределение относительной плотности по очагу деформации

Не выявлено изменения плотности в районе зоны W_1 , где выше отмечена потеря контакта с валком и снижение по модулю среднего напряжения. Этот факт можно объяснить тем, что повышение плотности носит необратимый характер. Как показали расчеты, при поступлении металла в зону пониженных давлений плотность уже достигла максимально возможной величины, поэтому снижение давления не приводит к ее изменению. Однако нагружение металла напряжениями по схеме двухосного сжатия вместо трехосного сжатия опасно тем, что недостаточно пластичный металл может претерпеть тот или иной вид разрушения.

Можно отметить, что довольно большая часть деформируемых сплавов вследствие низкой пластичности может быть обработана только в условиях прессования, т. е. при трехстороннем сжатии, и не может быть обработана в более жестких условиях нагружения, где третье напряжение равно нулю или даже является растягивающим. Тем более это касается пористых сред, у которых связность между частицами металла местами нарушена.

Таким образом, на основании проведенного анализа подтверждена возможность и целесообразность расширения сферы применения метода

совмещенной обработки заготовок прокаткой-прессованием для обработки некомпактных сред, в том числе стружки [55].

3.2 Исследование структуры и свойств длинномерных деформированных полуфабрикатов из стружки сплава АД31, полученных методом СПП

В реальных условиях работа установки СПП и процесс формирования прутка происходят в непрерывном режиме, поэтому четко провести разбиение всего процесса на отдельные этапы и отследить, как последовательно осуществляется деформация сыпучей массы в целом, не представляется возможным. Поэтому в дальнейшем описании прибегнем к такому приему, как условная дискретизация всего процесса на отдельные составляющие и детальное рассмотрение технологических нюансов реализации каждого из них. Весь цикл процесса переработки стружки алюминиевого сплава АД31 с помощью установки СПП может быть разбит на следующие стадии:

- компактирование стружки в брикеты прямоугольной удаленной формы;
- обжатие сбрикетированной заготовки в закрытом калибре, образованном валками установки СПП;
- распрессовка сбрикетированной массы в расширяющей части калибра перед матрицей;
- выдавливание (прессование) прутка через матрицу за счет активных сил трения на валках.

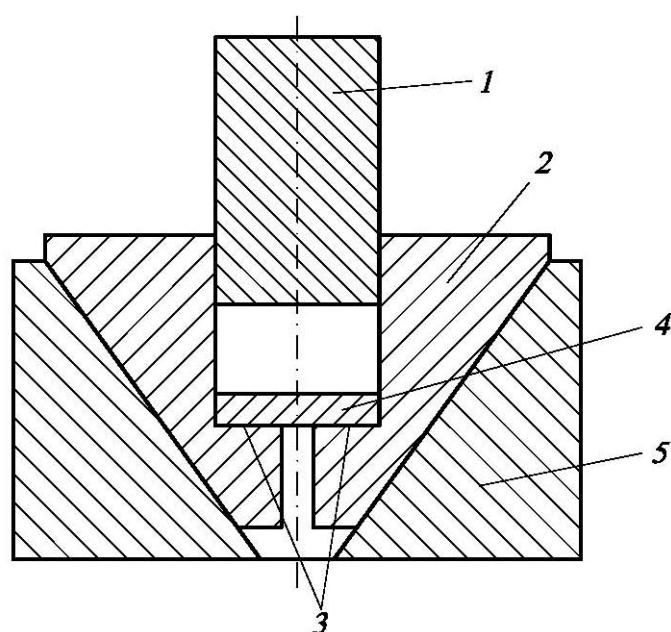
Формирование брикета под последующую совмещенную прокатку-прессование имеет свои особенности. Во-первых, они должны быть удлиненной формы с заданным соотношением размеров сечения (как правило, $h / b \approx 1$). Во-вторых, их плотность должна соответствовать определенному уровню, достаточному для обеспечения захвата материала валками и начала собственно процесса прокатки. С выполнением этих двух условий связана работа

промежуточной уплотнительной камеры, размеры которой должны соответствовать размерам общей рабочей зоны.

Что касается оценки величины достигаемого в прямоугольном брикете уровня плотности, то для решения указанной задачи в работе использовали моделирование процесса брикетирования стружки в специальной пресс-форме, включающей верхний и нижний пуансоны, разъемную матрицу и обойму с наклонными контактирующими поверхностями (рисунок 3.11) [66].



a



б

Рисунок 3.11 – Общий вид пресс-формы для моделирования процесса получения брикетов прямоугольной формы (а) и схема, поясняющая принцип ее работы (б): 1 – верхний пуансон; 2 – матрица; 3 – горизонтальные выступы; 4 – нижний пуансон; 5 – обойма

Пресс-форма работает следующим образом. Элементы 2 разборной матрицы устанавливаются в обойму 5. На горизонтальные выступы 3 элементов 2 матрицы помещают нижний пуансон 4. В полость матрицы засыпают стружку и сжимают ее верхним пуансоном 1. Давление брикетирования через стружку передается на нижний пуансон 4 и горизонтальные выступы 3 элементов 2 матрицы. Элементы 2 матрицы под действием давления брикетирования скользят вниз по наклонным поверхностям обоймы 5 и прижимаются друг к

другу. Усилие сжатия тем больше, чем больше прикладываемое усилие и меньше угол наклона к вертикали контактирующих поверхностей обоймы 5 и элементов 2 матрицы.

После окончания уплотнения стружки верхний пуансон 1 поднимают. При снятии давления брикетирования элементы 2 матрицы под действием бокового давления раздвигаются, скользя вверх по наклонным поверхностям обоймы 5. Таким образом, брикет разгружается равномерно, так как давление на него снимается одновременно со всех сторон.

Предварительно были проведены эксперименты, целью которых являлось построение зависимости достигаемой в ходе холодного брикетирования плотности от давления брикетирования при фиксированной площади продольного сечения брикета и заданной массе насыпки. Сечение брикета представляет собой прямоугольник размерами 15×200 мм, масса насыпки бралась равной 130, 150 и 180 г.

Результаты экспериментов представлены на рисунках 3.12 и 3.13, из которых видно, что по сравнению с круглыми в плане брикетами, несколько меньшими, чем в рассматриваемом случае, по площади поперечного сечения, периметру сечения и площади контактной поверхности с матрицей, относительная плотность брикетов при тех же значениях давления брикетирования будет немного выше.

Общий вид получаемых при давлении $p = 100$ МПа брикетов приведен на рисунке 3.14, а. Уровень их относительной плотности составлял порядка 80 %, а соотношение размеров сечения – $h / b \approx 1,5$, что вполне удовлетворяло условиям захвата при осуществлении дальнейшей совмещенной прокатки-прессования.

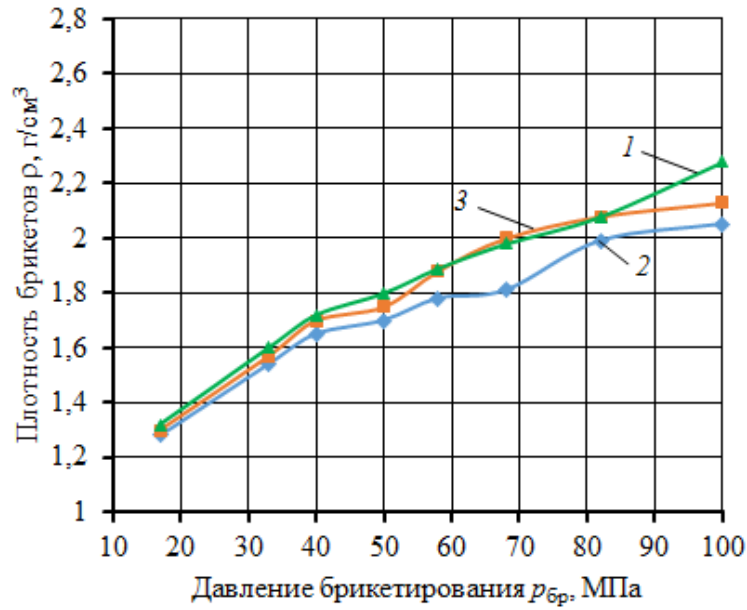


Рисунок 3.12 – Зависимость плотности брикетов из сплава АД31 от давления холодного брикетирования при различных значениях массы насыпки, г: 1 – 130; 2 – 150; 3 – 180

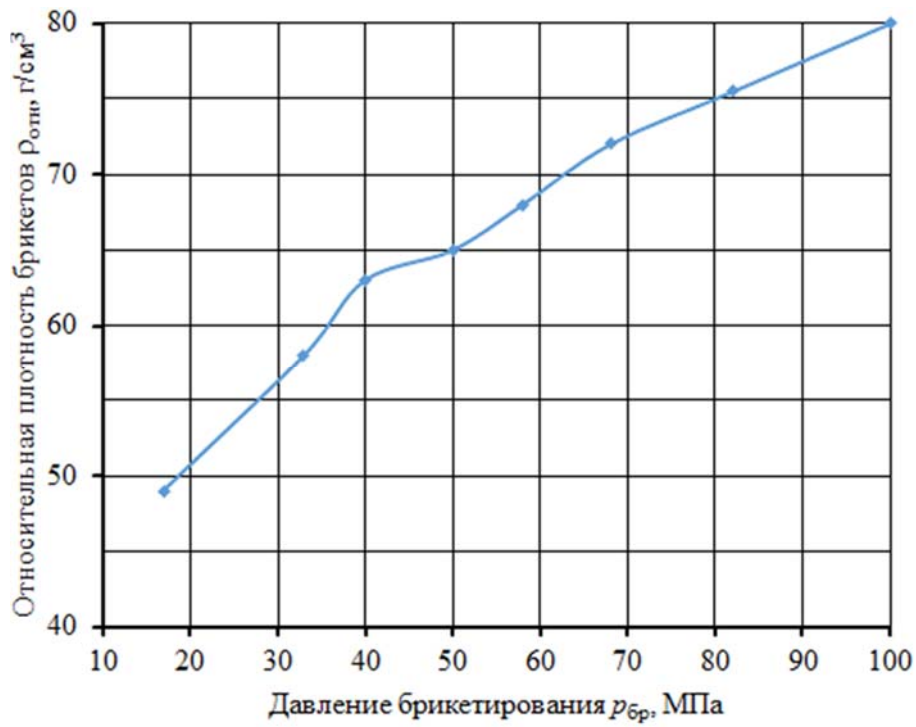


Рисунок 3.13 – Зависимость средней относительной плотности брикетов из стружки сплава АД31 от давления холодного брикетирования

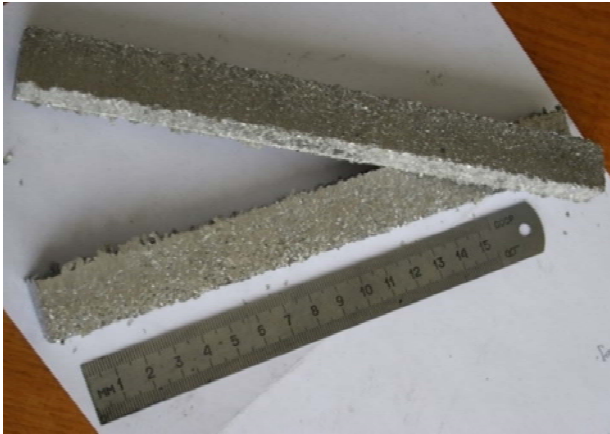
*a**б*

Рисунок 3.14 – Общий вид скомпактированных брикетов из стружки (*a*) и их подача в валки установки СПП-200 (*б*)

Лабораторное опробование процесса прокатки-прессования проводили на установке СПП-200 (рисунок 3.15), состоящей из электродвигателя переменного тока мощностью 40 кВт со скоростью вращения 900 об/мин, коробки передач, двухступенчатого редуктора с передаточным числом $i = 40$ и максимальным моментом на выходном валу 10 000 Н·м, шестеренной клетки и прокатной клетки, которая для удобства загрузки сыпучей массы в калибр повернута на угол 90° , при этом оси валков находятся на горизонтальной линии. Коробка передач и двухступенчатый редуктор обеспечивают следующие скорости валков n , об/мин.: 4, 6, 12 и 22. Технические характеристики установки приведены в таблице 3.1.

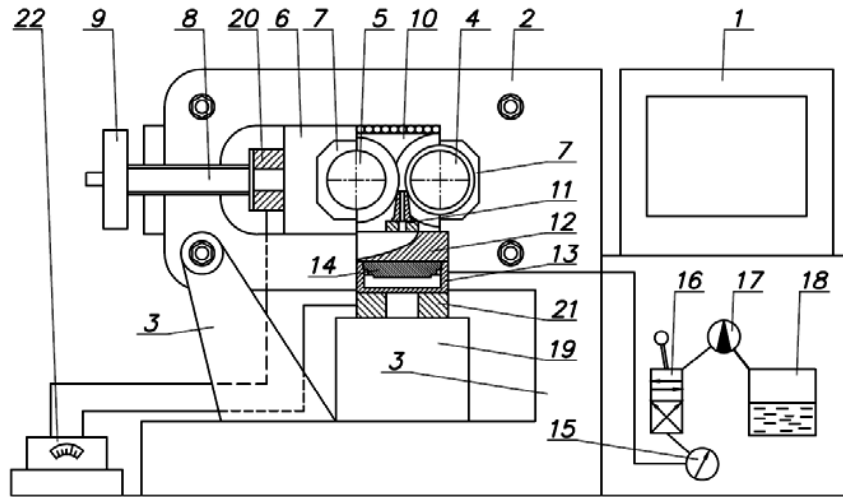


Рисунок 3.15 – Схема лабораторной установки СПП-200:

1 – печь для нагрева заготовки; 2 – станина; 3 – стальные опоры; 4 – валок с выступом; 5 – валок с канавкой; 6 – подушки; 7 – подшипники скольжения; 8 – нажимные винты; 9 – штурвал-шестерня; 10 – направляющее устройство; 11 – матрица; 12 – подставка; 13 – гидравлический цилиндр; 14 – плунжер; 15 – насос; 16 – гидрораспределитель; 17 – манометр; 18 – бак; 19 – опора; 20, 21 – мездозы; 22 – тензостанция

Таблица 3.1 – Технические характеристики установки СПП-200

Параметр	Размерность	Значение
Диаметр валков с выступом/ с канавкой	мм	214/164
Длина бочки валка	мм	240
Диаметр шейки вала	мм	100
Размеры калибра в наименьшем сечении	мм	7×15
Количество оборотов валка	об/мин	4, 8, 14
Передаточное число редуктора	ед.	40
Мощность электродвигателя	кВт	20
Момент на выходном валу	кН·м	10
Максимальное усилие прижима	кН	300

Рабочая клеть представляет собой две стальные станины закрытого типа, скрепленные между собой стяжными болтами и смонтированные на общем основании с двигателем, коробкой передач, редуктором и шестеренной клетью. Валки, установленные в станине в подшипниках скольжения, имеют выступ и

канавку (ручьи), образующие закрытый ящичный калибр. Матрица и валки выполнены из инструментальной стали с твердостью HRC 48÷52.

Методика проведения исследований заключалась в следующем. Полученные брикеты перед прокаткой-прессованием нагревали до температуры 500 ± 20 °С в печи сопротивления, расположенной вблизи установки СПП. Общее время нагрева составляло порядка 120 мин. Число одновременно нагреваемых брикетов равнялось двум-трем. Параллельно проводили подогрев валков установки СПП, которые в силу ряда технических причин, связанных с контактным способом нагрева, удалось нагреть только до температуры $\theta_{\text{в}} = 80 \div 100$ °С. Следует отметить, что предпочтительнее нагрев валков производить до более высоких температур (порядка 200÷300 °С), поскольку в это случае снижается скорость теплообмена между более нагретой заготовкой и менее нагретым инструментом.

В соответствии с методикой, изложенной в работе [36], проводили опыты по прокатке-прессованию брикетов, последовательно задавая их в валки один за другим (рисунок 3.14). Формоизменение металла изучали на недокатах (рисунок 3.16).



Рисунок 3.16 – Формоизменение металла при совмещенной прокатке-прессовании

Анализ показал, что при заданной величине обжатия при прокатке (не менее 50 %), относительная плотность сбrikетированной заготовки увеличивалась до значений $0,85 \div 0,9$. Это позволяло осуществить дальнейшую распрессовку металла и его выдавливание через матрицу с заданной величиной вытяжки (до 8).

У лабораторной установки СПП, на которой проводили эксперименты, катающий диаметр валка с выступом составляет 214 мм, с ручьем – 164 мм. Это предполагает удаленность зеркала матрицы от плоскости, проходящей через оси валков, на расстояние примерно 30 мм, а следовательно, площадь зеркала матрицы будет составлять $15 \times 20 = 300 \text{ мм}^2$.

Диаметры рабочих отверстий используемых для получения пресс-изделий матриц были выбраны 7 и 9 мм, что соответствовало значениям коэффициентов вытяжки при прессовании 8 и 5.

Для выявления характерной структуры и оценки уровня механических свойств полученных прутков из срединной части каждого из них отбирались образцы, которые в дальнейшем подвергались исследованиям и испытаниям, согласно существующим стандартным методикам.

Анализ результатов металлографических исследований (рисунок 3.17) показал, что принятая в ходе реализации в лабораторных условиях процесса СПП степень деформации при прессовании недостаточна для обеспечения качественного схватывания частиц стружки в процессе их совместной деформации. На микроструктурах видны четко выраженные границы раздела между отдельными стружками, представляющие собой поверхностные окисные пленки, и достаточно редко встречающиеся несплошности. Принципиальной разницы между структурами образцов, вырезанных из отпрессованных прутков диаметром 7 и 9 мм, нет. Они являются стабильными, представляют собой вытянутые в направлении истечения частицы стружки разной толщины, разделенные между собой устойчивыми к деформированию окисными пленками. Мостиков схватывания между стружками практически нет, т. е. формирование физического контакта протекает в основном на микронеровностях стружки с

частичным растеканием (но не разрушением) окисной пленки по всей контактной поверхности.

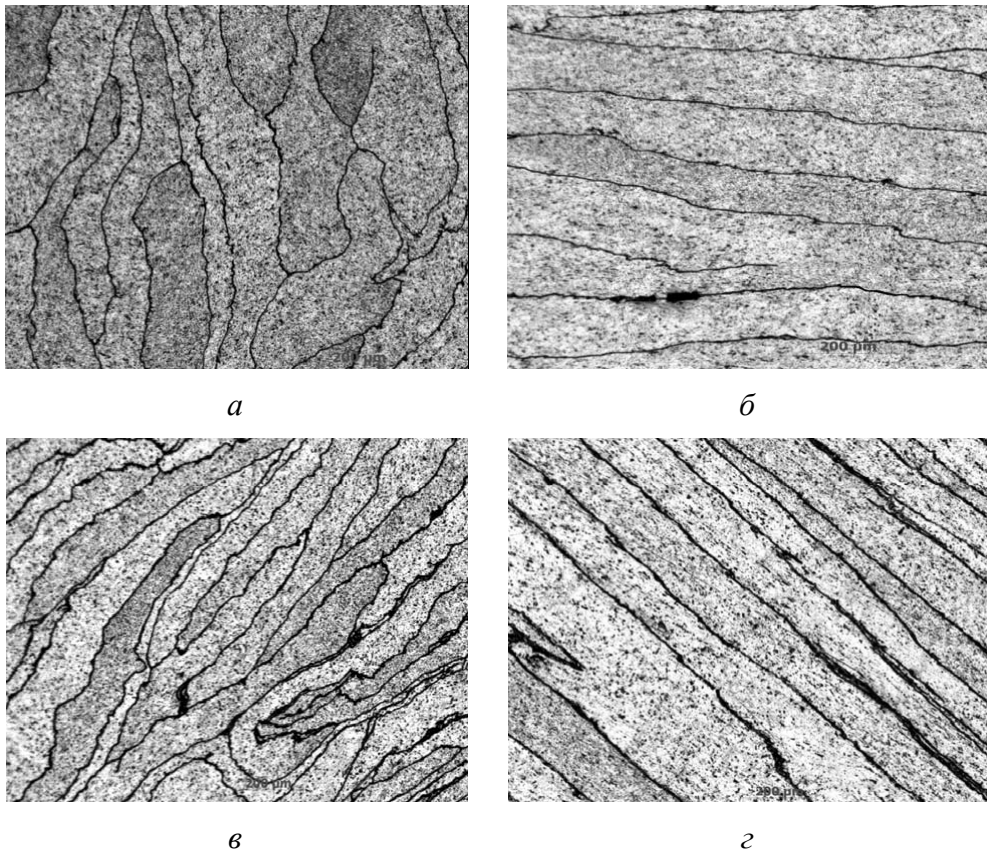


Рисунок 3.17 – Характерная микроструктура прутков в поперечном (*а, в*) и продольном (*б, з*) направлениях: *а, б* – пруток диаметром 9 мм; *в, з* – пруток диаметром 7 мм, $\times 160$

Таким образом, существует возможность получения анизотропного композиционного волокнистого материала, волокна которого ориентированы в одном направлении [67]. Следует отметить, что в данном случае речь идет о технической анизотропии, «проектируемой» заранее и возникающей при пластической обработке с определенной схемой деформации. Отрезки волокон (вытянутых стружек) имеют в зависимости от величины утонения разную длину. Поэтому на единицу площади поперечного сечения вырезанных из прутков образцов как в продольном, так и поперечном направлении приходится разное число волокон. Причем чем больше коэффициент вытяжки при прессовании (меньше диаметр прутка), тем больше будет протяженность границ между стружками в поперечном сечении образцов.

Для оценки уровня механических характеристик полученных СПП пресс-изделий были проведены испытания образцов, вырезанных из прутка диаметром 7 мм, на разрыв (таблица 3.2). Анализ представленных в таблице 3.2 данных свидетельствует о том, что временное сопротивление разрыву полученных методом СПП прутков достигает значений 180÷190 МПа, относительное удлинение – 12÷16 %, относительное сужение – 38÷42 %.

Таблица 3.2 – Механические свойства прутка диаметром 7 мм, полученного совмещенной прокаткой-прессованием

Номер образца	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
1	183	13,0	42,0
2	173	13,8	42,0
3	196	15,8	38,0

Сопоставление значений прочностных и пластических характеристик горячепрессованных прутков из алюминиевого сплава АД31 (таблицу 1.5) позволяет сделать вывод, что уровень механических свойств прутков, полученных методом СПП из стружки алюминиевого сплава АД31, примерно соответствует закаленному и естественно состаренному состоянию прутков из компактного материала после прессования.

3.3 Исследование структуры и свойств прутков, полученных методом непрерывного прессования из стружковых отходов сплава АК12

В машиностроении сплавы алюминия с кремнием (силумины) востребованы как легкие материалы, из которых можно получать детали наиболее дешевым способом – методом литья. В соответствии с нормативными документами технически чистый алюминий имеет временное сопротивление в отожженном состоянии 60 МПа, нагартованный – 145 МПа [68]. В сравнении с этими

значениями литейный силумин марки АК12 (10÷13 % Si, остальное алюминий и примеси) должен обладать временным сопротивлением 150 МПа. При этом возможности для деформационного упрочнения в известных технологиях отсутствуют, поскольку пластические свойства литейных алюминиевых сплавов достаточно низкие (нормативное относительное удлинение до разрыва составляет 1÷4 %). Таким образом, прочностные свойства силумина АК12 соответствуют технически чистому алюминию в нагартованном состоянии, т. е. эти свойства невелики. В целом сплав АК12 отличается высокой жидкотекучестью, низкой линейной усадкой, превосходной свариваемостью [69]. Дополнительное улучшение свойств сплава достигалось применением микролегирования и оптимизацией тепловых режимов [70].

Наличие низких пластических свойств материалов не дает возможности использовать прием упрочнения их с помощью пластической деформации. Применительно к термически неупрочняемым силуминам повышение прочностных свойств достигается в основном добавкой более прочных элементов (оксидов, силицидов) в состав шихты с получением композиционного материала [71, 72]. Кроме того, в практике металлообработки известен прием повышения пластических свойств в том случае, если исходная заготовка для обработки получается не методом литья, а методом порошковой металлургии. Так, например, анизотропные постоянные магниты из сплава марганец–алюминий–углерод, обладающего малой пластичностью, не удавалось получать без трещинообразования горячим прессованием из слитка, но удавалось получать формованием порошковой заготовки в оболочке с последующим горячим прессованием [73].

Сущность рассматриваемого в работе предложения состоит в том, чтобы для получения товарных заготовок использовать приемы компактирования и последующего горячего прессования стружки силумина, являющейся отходами машиностроительного производства.

Наиболее перспективным в этой связи представляется применение на этапе получения промежуточного полуфабриката-прутка способов непрерывного

прессования, например, метода совмещенной прокатки-прессования [50]. Выше этот метод был рассмотрен применительно к переработке стружки сплава системы алюминий–магний–кремний.

Ставилась задача оценить возможность использования метода СПП для получения прутков, а в дальнейшем и изготовления из них проволоки из стружки силумина марки АК12. Для проведения исследований использовали один (занимающий по объему основное место) из образующихся при механообработке заготовок литых дисков колес типов стружковых отходов (рисунок 2.14). Перед компактированием стружка специальной предварительной обработке не подвергалась. Незначительные следы смазочно-охлаждающей жидкости, остающиеся на поверхности частиц стружки, выгорали в процессе ее дальнейшего нагрева.

Технологическая схема изготовления прутково-профильной продукции подразумевала последовательное выполнение операций брикетирования, прессования и волочения. В ходе ее реализации для получения пресс-изделий круглого поперечного сечения использовали лабораторную установку совмещенной прокатки-прессования СПП-200 (рисунок 3.15).

При получении заготовок-брикетов под последующую совмещенную прокатку-прессование основное условие, наряду с достижением требуемого уровня интегральной плотности, сводится к формированию прессовки в виде прямоугольного бруса с определенным соотношением размеров сечения по высоте и ширине. Такая особенность обусловлена спецификой протекания деформационных процессов на начальном этапе осуществления СПП при задаче металла в закрытый калибр, образованный валками. Было установлено, что при получении брикетов удлиненной формы в виде прямоугольного параллелепипеда с соотношениями высоты к ширине порядка 1, а длины к ширине порядка 10 (такие соотношения размеров брикетов обусловлены спецификой конструкции и работы лабораторной установки совмещенной прокатки-прессования) применение наиболее распространенного на практике процесса одностороннего холодного брикетирования в жесткой пресс-форме не совсем приемлемо. Даже при

сравнительно высоких значениях давления брикетирования порядка 120÷160 МПа полученные штабики при выпрессовке разрушались, что объяснялось относительно низкой плотностью брикетов, малой связностью отдельных фрагментов стружки между собой и нерациональной схемой выпрессовки.

Поэтому брикетирование стружки производили в пресс-форме, конструкция которой была рассмотрена ранее (рисунок 3.11).

Собранную пресс-форму с засыпанной навеской стружки размещали внутри рабочего пространства печи и в таком виде устанавливали на рабочем столе вертикального гидравлического пресса с усилием 1 МН. После нагрева пресс-формы до температуры $\theta_{бр} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ через верхний пуансон прикладывали давление брикетирования $p_{бр} = 160 \text{ МПа}$ и выдерживали при этом давлении в течение $\tau_{бр} = 0,5 \text{ мин}$. После снятия давления брикетирования элементы разъемной матрицы под действием бокового давления раздвигали, осуществляя скольжение их вверх по наклонным поверхностям обоймы. При такой схеме брикет разгружается равномерно, давление на него снимается одновременно со всех сторон, что исключает переламывание брикета в момент извлечения его из пресс-формы.

В результате были сформированы несколько брикетов размерами $h \times b \times l = 13 \times 15 \times 200 \text{ мм}$ и относительной плотностью 85÷87 %. Для оценки прочностных характеристик полученных брикетов от одного из них вырезкой в трех местах по длине отбирали образцы приблизительно квадратного сечения, которые в дальнейшем подвергали сжатию на плоских полированных бойках с использованием универсальной испытательной машины LFM 400. Сам процесс сжатия в каждом случае фиксировался специальным протоколом, после обработки результатов испытаний определяли максимальную силу сжатия $P_{сж}$ до момента разрушения образцов и по формуле (2.2) рассчитывали величину, эквивалентную временному сопротивлению разрыву материала. Диапазон изменения значений σ_v материала брикета составил от 170 до 180 МПа.

Перед тем как задать в валки, брикеты нагревали до температуры 500 ± 20 °С в отдельно стоящей печи, расположенной вблизи установки СПП. Параллельно проводили подогрев валков до температуры $80 \div 100$ °С. Подачу брикетов в закрытый калибр, образованный валками, осуществляли последовательно один за другим, стремясь к сокращению до минимума пауз между их поступлением в очаг деформации. Зазор между валками, составляющий в данном случае $7 \div 8$ мм, обеспечивает уплотнение стружки на стадии прокатки до относительной плотности $93 \div 95$ %. Следовательно, в зону распрессовки поступает уже достаточно уплотненный материал, что облегчает деформацию осадки металла стружки в поперечном направлении калибра в очаге распрессовки. Диаметр рабочего отверстия используемой для получения прутков матрицы был выбран равным 7 мм, что соответствовало значению коэффициента вытяжки при прессовании $\mu = 8$.

При осуществлении процесса СПП с помощью двух отдельных месдоз, установленных в специально отведенных для этого местах, производилась оценка силового воздействия, оказываемого деформируемым металлом, отдельно на матрицу и валки установки. Общий вид полученной осциллограммы, на которой отображено изменение силовых условий осуществления процесса при последовательной задаче в валки трех (это видно по числу пиков) скомпактированных брикетов, приведен на рисунке 3.18. Расшифровка осциллограммы показала, что максимальное усилие на матрице составляет $320 \div 330$ кН, а на валках – $140 \div 180$ кН. После поступления в валки последней заготовки и окончания процесса прессования в деформируемой зоне перед матрицей образуется пресс-остаток, на продольном разрезе которого можно отследить характер формирования структуры прессуемого прутка вдоль его оси (рисунок 3.19).

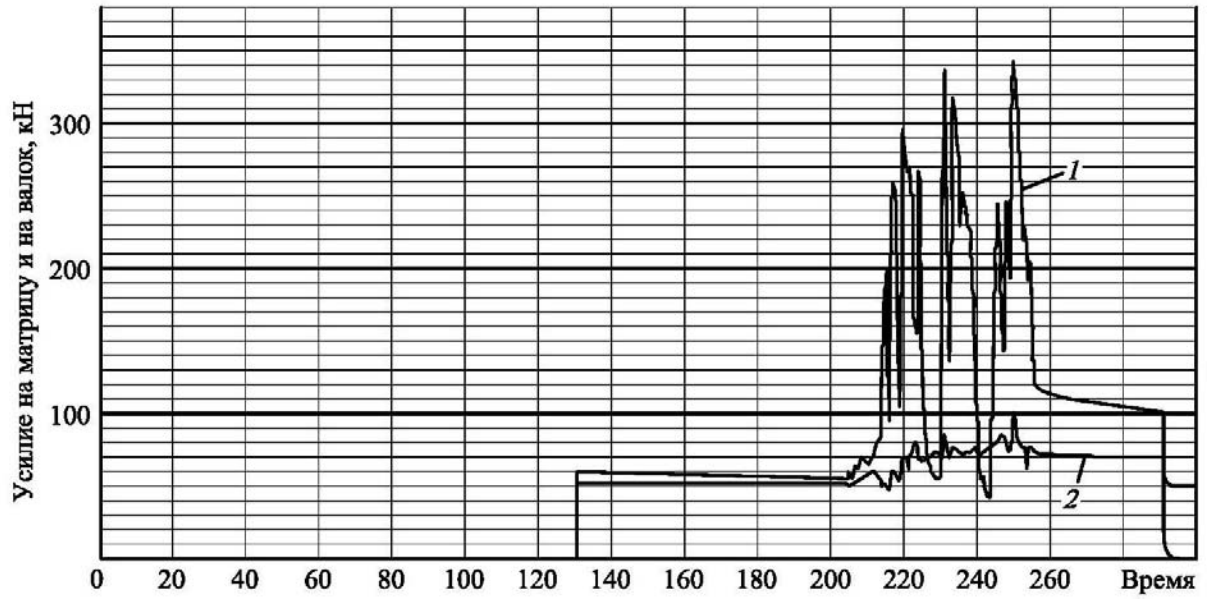


Рисунок 3.18 – Осциллограмма, отражающая характер изменения усилия, действующего на матрицу, и усилия, действующего на валок, в ходе осуществления процесса СПП

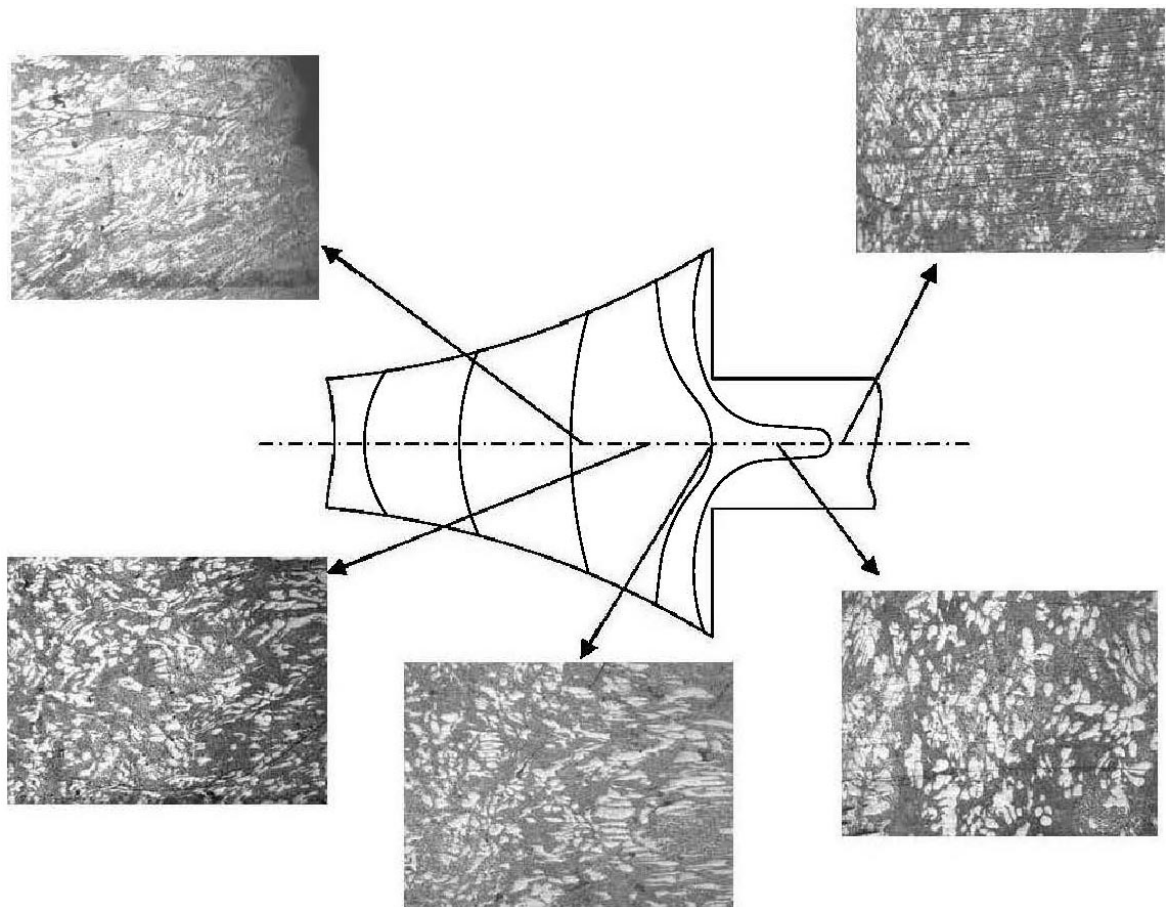


Рисунок 3.19 – Изменение микроструктуры вдоль очага деформации при совмещенной прокатке-прессовании

Приведенные структуры подтверждают известный факт [50] о наличии при СПП в очаге деформации, образованном валками и матрицей, активных сил трения и трех ярко выраженных областей:

- зоны обжатия с одновременным доуплотнением брикета валками, характеризующей стадию прокатки (на рисунке 3.19 не показана);
- зоны распрессовки скомпактированной массы в расширяющейся по высоте части калибра;
- участка вблизи матрицы на стадии выдавливания металла через ее рабочее отверстие.

Анализ микроструктур, представленных на рисунке 3.19, позволяет отследить те изменения в структуре, которые происходят в очаге деформации. Эти изменения связаны с прохождением металла разных зон: прокатки, распрессовки и прессования. Структура участков, расположенных в зоне распрессовки (рисунок 3.19) вблизи поверхности, имеет более тонкое строение, чем в центральной области. В центральных слоях зоны прессования деформация сжатия выше, чем около поверхности, что приводит к расплющиванию частиц стружки и их вытягиванию в направлении перемещения металла. Анализ микроструктуры показал, что прессования с вытяжками порядка $5\div 8$ приводит к достаточно плотной упаковке стружки и отсутствию пустот и пор. При этом происходит формирование очага деформации, свойственного обычному процессу прямого прессования. У торцевой поверхности (зеркала) матрицы появляются небольшие по размерам упругие зоны металла, обозначающие границы пластической зоны и тормозящие течение металла, а зона развитых деформаций, по форме несколько напоминающая конус, характеризуется преимущественным течением центральных слоев и несколько сдерживающим течением периферийных.

Обжимающая часть пластической зоны перед матрицей постепенно переходит в калибрующий участок матрицы, в пределах которого из-за проявления реактивных сил трения создается соответствующее силовое

противодействие (подпор), что позволяет сформировать окончательную структуру пресс-изделия в продольном и поперечном сечениях (рисунок 3.20).

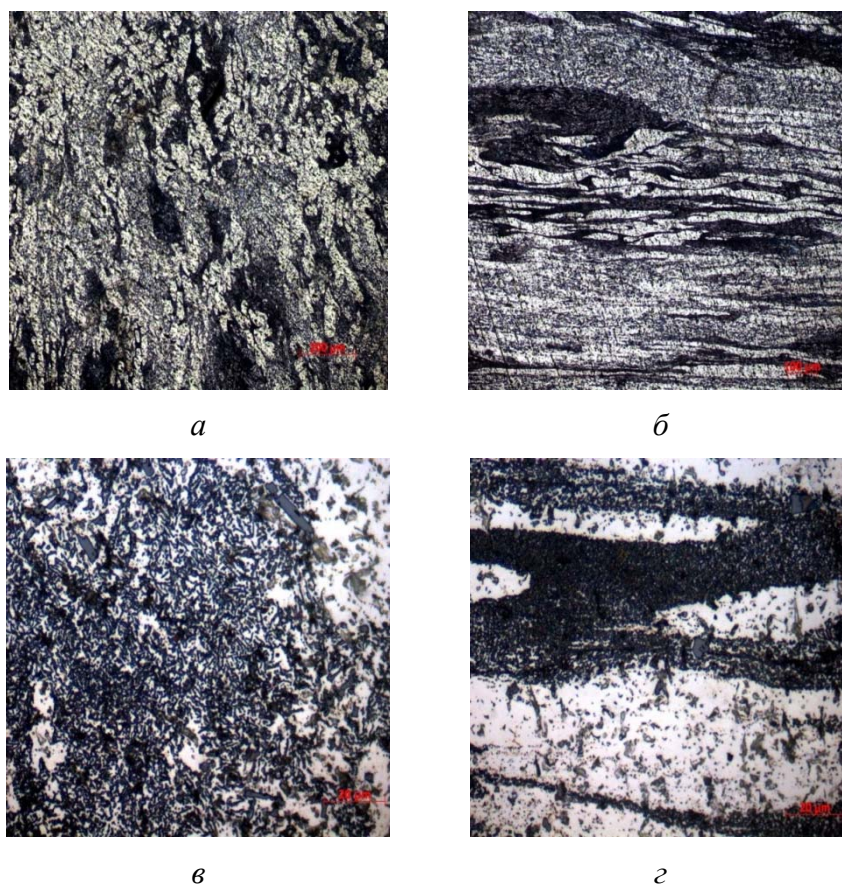


Рисунок 3.20 – Микроструктуры прутка диаметром 7 мм после совмещенной прокатки-прессования в поперечном (*а, в*) и продольном (*б, г*) сечениях при разном увеличении: *а, б* – $\times 100$; *в, г* – $\times 1000$

Структура прутка в продольном направлении строчечная, т. е. светлые, вытянутые в направлении истечения из матрицы участки алюминиевой фазы перемежаются с более темными областями, насыщенными кремнием. При этом концентрация, размер частиц кремния и порядок их распределения на фоне алюминиевой фазы носят несколько неоднородный характер.

Для оценки механических характеристик отпрессованного прутка из него, в соответствии с ГОСТ 1497–84, изготавливали образцы с соотношением размеров рабочей части $l_0 / d_0 = 5$. В дальнейшем их подвергали испытаниям на растяжение на универсальной электромеханической машине LFM 400 с построением

первичной диаграммы растяжения. Путем обработки полученных данных (по результатам испытаний пяти образцов) было установлено, что уровень прочностных свойств прутка соответствует значениям временного сопротивления разрыву $\sigma_b = 220 \div 230$ МПа, а пластических – относительному удлинению $\delta = 5 \div 7$ % и относительному сужению $\psi = 8 \div 10$ %.

Таким образом, установлено, что прочностные свойства горячедеформированных прутков оказались выше на $50 \div 55$ %, чем это нормируется стандартом на литое состояние, при увеличении одновременно и пластических свойств. Объяснить это явление можно деформационным упрочнением и заторможенностью протекания процессов рекристаллизации в алюминиевых сплавах [74], содержащих кремний [75].

3.4 Новое техническое решение по конструкции устройства для получения проволоки и профилей из некомпактных материалов методом совмещенной прокатки-прессования

Обеспечить стабильную подачу сыпучей массы в зону деформации позволяет использование специальных шнековых механизмов, работа которых должна быть синхронизирована с работой установок, задействованных непосредственно при производстве пресс-изделий. В частности, шнековая подача перерабатываемых сыпучих, преимущественно стружковых, металлических отходов лежит в основе работы получивших широкое распространение брикетировочных прессов. Так, например, гидравлические прессы фирмы RUF применяют для холодного двукратного прессования определенной порции сыпучего материала без добавления связующих веществ. На каждом цикле происходит формирование только одного брикета с одновременным извлечением другого брикета, полученного на предыдущем цикле. Таким образом, указанное оборудование может служить только для предварительного компактирования сыпучих отходов перед их переплавом и не могут быть использованы для непосредственного изготовления пресс-изделий различного поперечного сечения.

Кроме того, циклический характер перемещения отдельных элементов камер предварительного сжатия и рабочих пресс-форм сказывается на производительности пресса в целом, снижая эффективное время его работы.

В качестве альтернативного варианта предложена новая конструкция установки совмещенной прокатки-прессования, адаптированная к переработке сыпучих стружковых отходов алюминиевых сплавов [76]. Схема установки приведена на рисунке 3.21 и включает подогреваемый контейнер 1, форкамеру 2, приводной шнек 3, расположенный в контейнере 1, валок с ручьем 4 и валок с выступом 5, образующие закрытый калибр 6, на выходе из которого установлена матрица 7 с гидropriжимом 8.

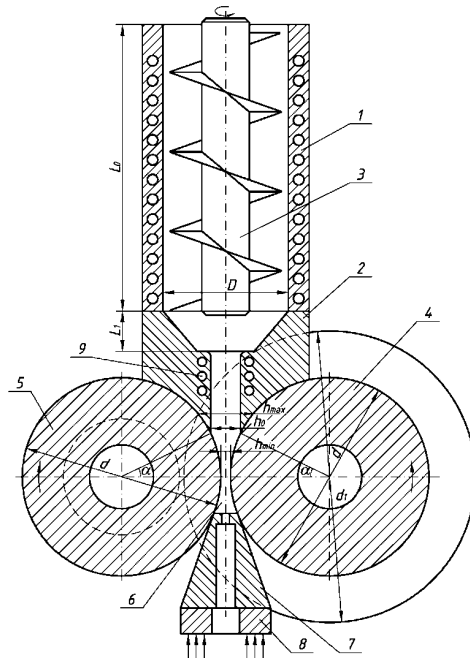


Рисунок 3.21 – Схема устройства для совмещенной прокатки-прессования пресс-изделий из сыпучей стружки алюминиевых сплавов: 1 – контейнер; 2 – форкамера; 3 – приводной шнек; 4 – валок с канавкой; 5 – валок с выступом; 6 – закрытый калибр; 7 – матрица; 8 – гидropriжим; 9 – нагреватели

Форкамера, снабженная нагревателями 9 и находящаяся между контейнером и валками, имеет внутреннюю полость с переменным сечением. Она состоит из участка прямоугольного сечения, размеры которого по высоте не превышают высоты калибра в месте пересечения катающих диаметров валка с ручьем и валка с выступом, а по ширине соответствуют ширине закрытого

калибра, а также участка конического сечения, минимальные размеры которого совпадают с размерами участка прямоугольного сечения, а максимальные – на границе с контейнером определяются диаметром D , мм, из соотношения

$$D = (2,8 \div 3,6) \cdot \sqrt{b \cdot h_{\min}}, \quad (3.2)$$

где b – ширина закрытого калибра, мм;

h_{\min} – высота закрытого калибра в наименьшем сечении, мм.

Наличие такой форкамеры позволяет перед прокаткой произвести предварительное брикетирование сыпучего материала и скомпактировать в форкамере прямоугольную заготовку с необходимой степенью уплотнения, достаточной для последующей деформации путем выдавливания металла валками через отверстие матрицы (метод совмещенной прокатки-прессования). При этом для снижения сопротивления деформации материала и, соответственно, энергосиловых затрат форкамера может быть снабжена нагревателями, обеспечивающими стабильные температурные условия в очаге деформации.

Выбор размера диаметра форкамеры обусловлен следующим. Как известно [77], для гарантированного протекания процесса уплотнения в форкамере необходимо, чтобы коэффициент уплотнения материала k_y находился в пределах от 3 до 5, т. е. отношение площади F_1 поперечного сечения рабочей полости форкамеры диаметром D на входе в нее сыпучего материала и площади F_0 скомпактированной прямоугольной заготовки на выходе из нее равнялось

$$\frac{F_1}{F_0} = k_y = 3 \div 5, \text{ где } F_1 = \pi \frac{D^2}{4}; F_0 = b \cdot h_0.$$

Выразив величину F_0 через высоту калибра в наименьшем сечении h_{\min} , в котором реализуется максимальное обжатие при прокатке, получим

$$F_0 = b \cdot h_{\min} \frac{1}{1 - \varepsilon}, \quad (3.3)$$

где ε – относительное обжатие при прокатке.

Подставляя полученные значения в исходное соотношение и, учитывая, что для гарантированной реализации процесса совмещенной прокатки-

прессования обжатие при прокатке должно составлять не менее 50 % ($\varepsilon = 0,5$), получим приведенное выше соотношение.

Устройство работает следующим образом. Сыпучий металлический материал в виде, например, стружковых отходов непрерывно подается в контейнер 1 и с помощью вращающегося шнека 3 перемещается в конический участок форкамеры 2. По мере создания необходимого давления происходит уплотнение материала, перемещение его к прямоугольному участку форкамеры и формирование более плотной заготовки соответствующих размеров для последующей задачи в валки.

Важным при этом является определение параметров участка прямоугольного сечения, один из размеров которого должен соответствовать ширине закрытого калибра b , а другой – не превышать максимальную высоту h_{\max} , ограниченную плоскостью, проходящей через точку пересечения максимального диаметра вала с ручьем d_1 и диаметра вала с выступом d . В противном случае происходит раскрытие калибра и процесс формоизменения становится неконтролируемым.

По мере сближения с вращающимися с определенной угловой скоростью валками заготовка поступает в образованный этими валками закрытый калибр b , заполняет его, обжимается валками, продвигается до матрицы 7, поджатой к валкам гидropriжимом 8, распрессовывается и выдавливается в виде пресс-изделия заданной формы, например прутков круглого сечения диаметром d_n , через матрицу 7.

Таким образом, использование в предлагаемом устройстве контейнера, имеющего конический элемент с переходным сечением по форме и размерам калибра в месте контакта с валками с минимальной высотой h , рассчитанной из соотношения $(0,09 \div 0,11)d_2$, и длиной, определенной из выражения $L = (0,35 \div 0,5)h$, позволяет повысить уровень пластических и прочностных свойств, а следовательно, качество пресс-изделий. Кроме того, существенно расширяются технологические возможности в плане получения продукции с регламентированной структурой и заданным уровнем механических свойств.

Предложенное новое техническое решение дает возможность расширить сферу применения способов непрерывного прессования сыпучих материалов из алюминиевых сплавов за счет создания устройств для их реализации. Эти устройства позволяют получать длинномерные деформированные полуфабрикаты из стружки алюминия и его сплавов без стадии переplava с удовлетворительными механическими свойствами и необходимыми эксплуатационными характеристиками.

3.5. Выводы по главе

1. На основании компьютерного моделирования процесса совмещенной прокатки-прессования пористой заготовки в программном пакете QFORM V8, подобраны необходимые параметры данного процесса и выбрана в качестве основного оборудования установка СПП-200. Установлено, что картина напряженно-деформированного состояния заготовки несимметрична относительно ее продольной оси, а на выходе из очага деформации плотность заготовки приближается к плотности компактного материала.

2. С помощью компьютерного моделирования процесса выявлены области очага деформации, в которых металл по тем или иным причинам не соприкасается с инструментом. Эти зоны наблюдаются со стороны вала с выступом, поэтому именно в них высока вероятность появления трещин, что необходимо учитывать при дальнейшем распространении данного метода для обработки некомпактных сред.

3. Проведена серия экспериментов по получению методом совмещенной прокатки-прессования прутков из стружки сплавов АД31 и АК12. Отмечены особенности получения и характеристики брикетов для осуществления процесса СПП, отработана последовательность действий для его реализации, изготовлены опытные образцы продукции. С использованием стандартизованных методик и приемов проведены механические испытания их на растяжение и металлографические исследования, позволившие установить, что принятые в ходе

реализации в лабораторных условиях процесса СПП температурно-скоростные и деформационные параметры не обеспечивают качественного схватывания частиц стружки в процессе деформации. Это обуславливает по сравнению с дискретным прессованием снижение прочностных свойств прутков из стружки сплава АД31 до уровня $\sigma_b = 125 \div 135$ МПа, из стружки сплава АК12 (после отжига) – до уровня $\sigma_b = 105 \div 115$ МПа с одновременным снижением и их пластических характеристик.

4. Предложено техническое решение по совершенствованию конструкции устройства для получения проволоки и профилей из некомпактных материалов методом совмещенной прокатки-прессования, защищенное авторским свидетельством, позволяющее за счет совмещения работы рабочей клетки установки СПП и шнекового подающего устройства существенно расширить сферу применения способов непрерывного прессования сыпучих материалов из алюминиевых сплавов.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ, ПОЛУЧЕННОЙ ВОЛОЧЕНИЕМ ИЗ ПРЕССОВАННЫХ РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ ПОРИСТЫХ ПРУТКОВ

В отличие от других процессов обработки металлов давлением, прессование позволяет создать одновременно высокий уровень сжимающих напряжений и высокий уровень сдвиговых деформаций, вклад которых в процесс уплотнения был отмечен выше. В этом разделе с применением методов компьютерного и физического моделирования дан анализ процесса холодного волочения прутков, полученных способами дискретного и непрерывного прессования из брикетированных заготовок.

Основные результаты исследований опубликованы в работах [36–38, 40–42, 53, 54, 58, 59, 78].

4.1 Моделирование процесса деформации пористого прутка из алюминиевого сплава АД31 при волочении

Для решения краевой задачи применили метод конечных элементов, реализованный в программном продукте ABAQUS, использовали версию программы с количеством конечных элементов до 1 000.

Прочностные свойства сплава АД31 описаны кривой упрочнения в соответствии с данными справочника [79]: сопротивление деформации $\sigma_s = 50 + 246\varepsilon^{0,378}$, где ε – степень деформации. Пруток диаметром 9 мм протягивается через волоку диаметром 8 мм с коэффициентом вытяжки $\mu = 1,26$, относительным обжатием 21 % и степенью деформации $\varepsilon = \ln \mu = 0,236$. Длина калибрующего пояса установлена на уровне 25 % от диаметра волоки, угол наклона образующей волоки равен 8° .

Граничные условия описаны следующим образом:

- задано линейное перемещение переднего конца проволоки u_2 (в декартовой системе координат это перемещение u_z);
- задано закрепление волоки по линейным и угловым координатам;
- на контактной поверхности действует закон трения Кулона, условия применения которого характеризуются различными значениями коэффициента трения.

Моделируемое пространство – осесимметричное. Проволока и волока представляют собой деформируемые тела, поэтому оба объекта имеют разбиение на конечные элементы. Поскольку моделируемое тело представляет собой пористую среду, не обладающую свойством несжимаемости, то становится невозможным применить условие текучести Мизеса.

Модель пористой среды имеется в интерфейсе программного модуля и описывается условием текучести Гарсона, которым пользовалось достаточно большое число исследователей [80–82]. Условие текучести построено на схеме деформирования сферической поры в идеально пластическом материале и работоспособно при малой величине пористости. Программным модулем рекомендовано применять значения параметров уравнения текучести $q_1 = 1,0 \div 1,5$; $q_2 = 1$; $q_3 = 1,00 \div 2,25$. В решении использованы значения $q_1 = q_2 = q_3 = 1$, начальная относительная плотность материала равна 0,9 (относительная пористость 10 %).

В качестве переменного параметра выбран коэффициент трения, который варьировали на четырех уровнях: 0,05; 0,1; 0,2 и 0,3. При волочении иногда назначают и меньшие значения коэффициента трения, но они характерны для режима жидкостного или гидродинамического трения, такой режим не возможен в условиях эксперимента. Повышенные значения коэффициента трения обусловлены вероятностью выдавливания смазки из зоны контакта металла с инструментом и способностью алюминия и его сплавов налипать на инструмент.

Таким образом, процесс волочения может начинаться при одних значениях коэффициента трения, а заканчиваться – при других.

На рисунке 4.1 показаны начальная нестационарная стадия волочения и стационарная стадия при коэффициенте трения 0,05. При этом выделены области равного уровня относительной плотности RD.

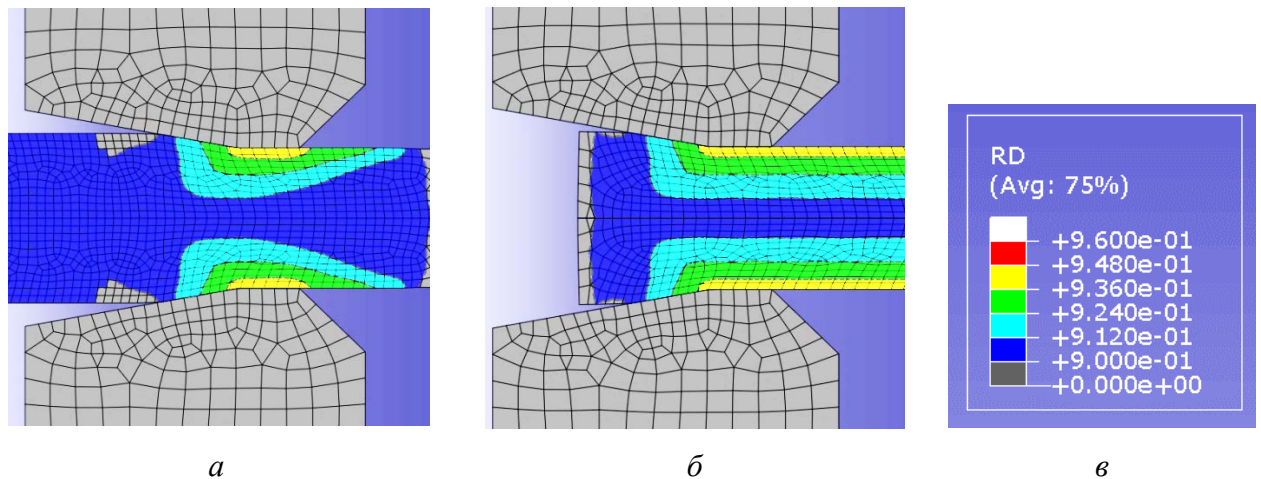


Рисунок 4.1 – Распределение относительной плотности RD при волочении прутка (коэффициент трения 0,05): *а* – начальная стадия; *б* – стационарная стадия; *в* – цветовой ключ

Как видно, передняя часть прутка выходит из волоки с первоначальной плотностью (рисунок 4.1, *а*), что объясняется отсутствием уплотнения в ходе предварительного обжатия заготовки. При стационарной стадии процесса (рисунок. 4.1, *б*) устанавливается однородное поле плотности по длине заготовки, но разнородное по диаметру. Наибольшее уплотнение происходит в периферийных слоях заготовки. Центральная зона уплотнению не подвергается.

Влияние коэффициента трения на процесс уплотнения показано на рисунке 4.2: при малом коэффициенте трения в направлении радиальной координаты можно выделить две зоны уплотнения, причем в периферийной зоне уплотнение больше, чем в центральной зоне; при увеличении коэффициента трения до 0,2 в центре появляется третья зона с пониженным до исходного значения плотности. Эта зона расширяется при увеличении коэффициента трения до 0,3.

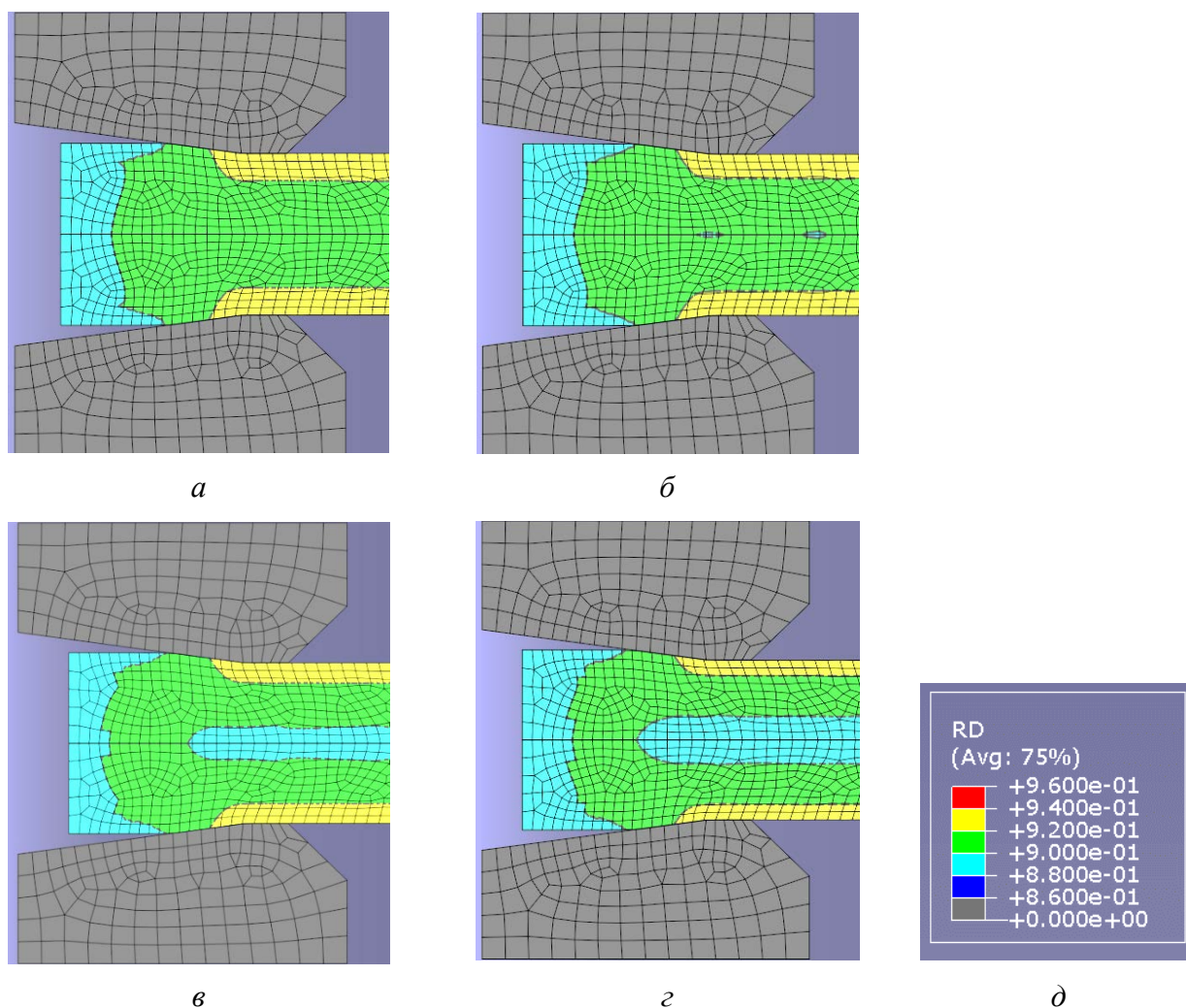


Рисунок 4.2 – Распределение относительной плотности RD в процессе волочения прутка при коэффициентах трения: *a* – 0,05; *б* – 0,1; *в* – 0,2; *з* – 0,3; *д* – цветовой ключ

В работе [83] расчетами и экспериментальными данными на примере поведения одиночной поры было показано, что ее размеры, а значит и общая пористость в центре прутка, могут не только не уменьшаться, но и наоборот увеличиваться, несмотря на наличие сжимающих напряжений. Такое явление может быть объяснено влиянием нескольких факторов, например, различным средним (гидростатическим) давлением либо различной величиной сдвиговых деформаций, которые должны способствовать процессу уплотнения.

Результаты расчета распределения величины Pressure (обратная по знаку величина по отношению к гидростатическому давлению) представлены на рисунке 4.3. Наиболее важные зоны относятся к очагу деформации, т. е. находятся между контактной поверхностью деформируемого материала с волокой. Здесь

видно, что при малом коэффициенте трения зоны интенсивного сжатия располагаются в периферийных областях заготовки, примыкающих к поверхности волокна. На уровне калибрующего пояска возникают зоны растяжения, которые обусловлены действием тянущего усилия.

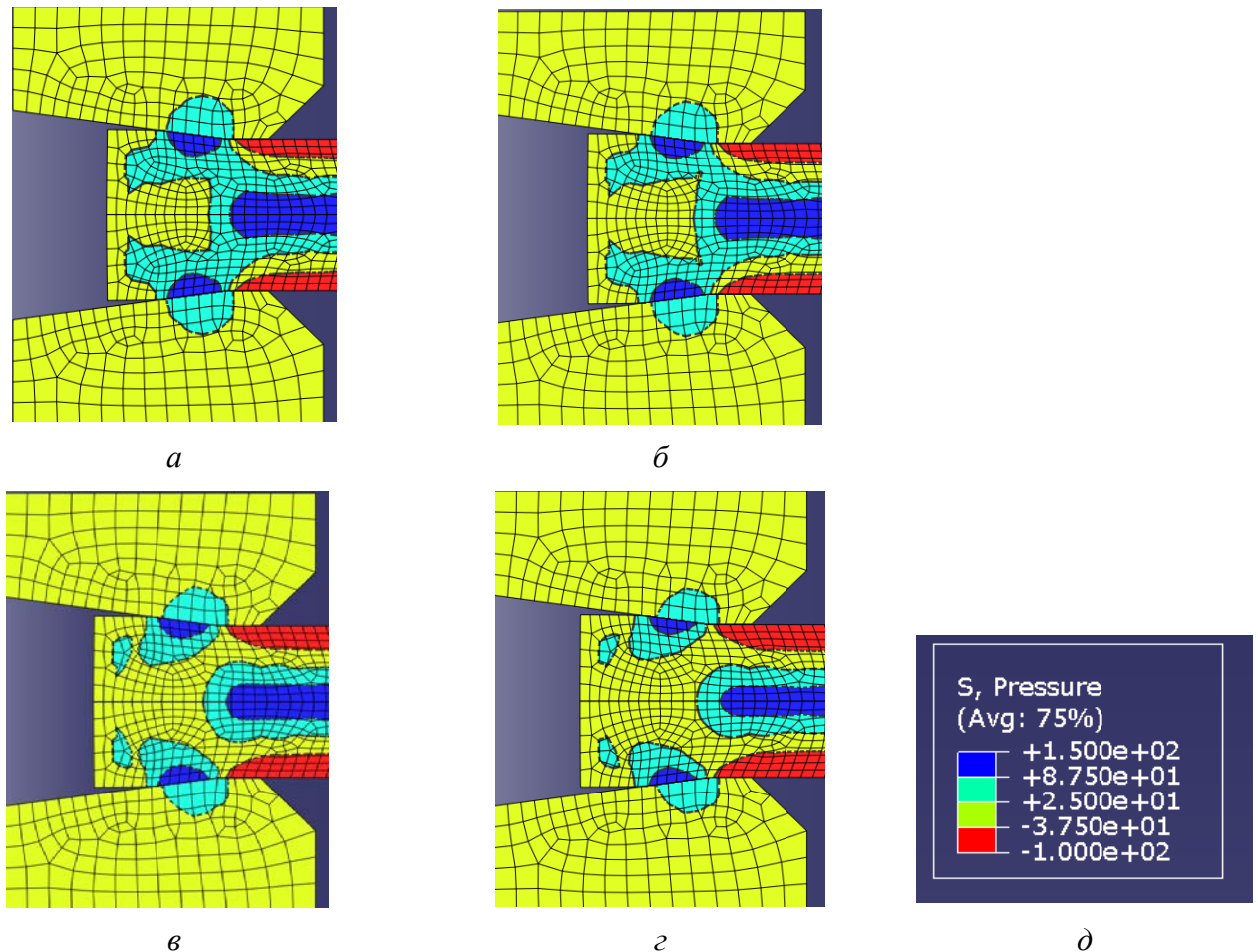


Рисунок 4.3 – Распределение величины Pressure при различных коэффициентах трения:

a – 0,05; *б* – 0,1; *в* – 0,2; *г* – 0,3; *д* – цветовой ключ

При увеличении коэффициента трения зоны действия напряжений сжатия все в большей степени локализируются вблизи контактных поверхностей, не проникая в центральную область. Такая картина качественно согласуется с распределением плотности, приведенным на рисунке 4.2. Распределение степени деформации PEEQ (рисунок 4.4) отражает увеличение этой величины от входа в очаг деформации до выхода из него и последующее ее неравномерное распределение по координате радиуса.

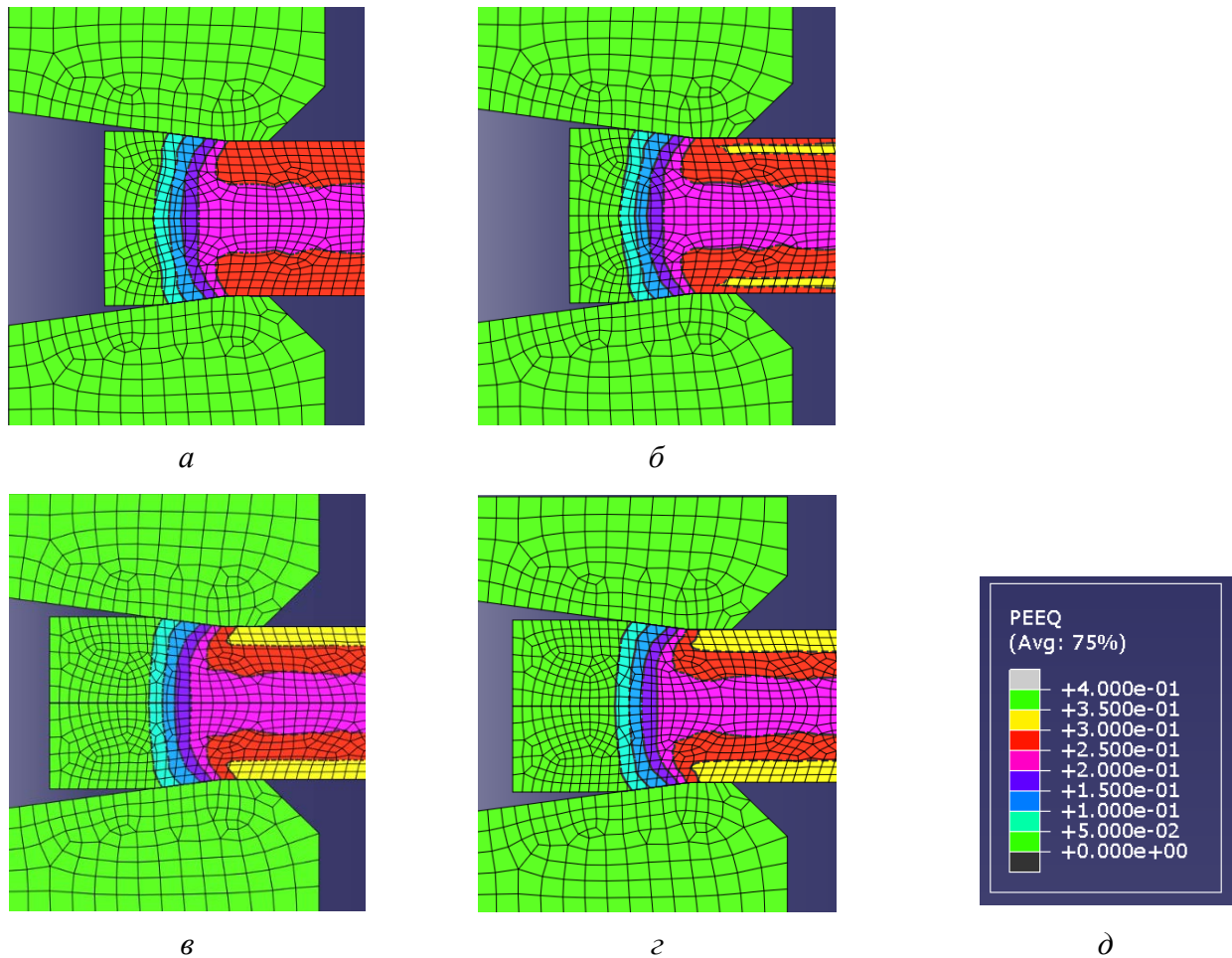


Рисунок 4.4 – Распределение степени деформации PEEQ при различных коэффициентах трения:
a – 0,05; *б* – 0,1; *в* – 0,2; *з* – 0,3; *д* – цветовой ключ

Максимальное значение данного показателя характерно для периферии проволоки, а наименьшее – для центральной области. Это качественно согласуется с результатами работы [84], хотя рассматриваемые режимы волочения несколько разнятся между собой. Таким образом, качественно распределение степени деформации также соответствует распределению плотности.

Уплотнению деформируемого материала способствуют и дополнительные касательные напряжения. При осесимметричной деформации они могут быть оценены компонентой тензора напряжений σ_{rz} . Эта компонента, обозначенная как S_{12} , отражена на рисунке 4.5 областями и линиями равного уровня.

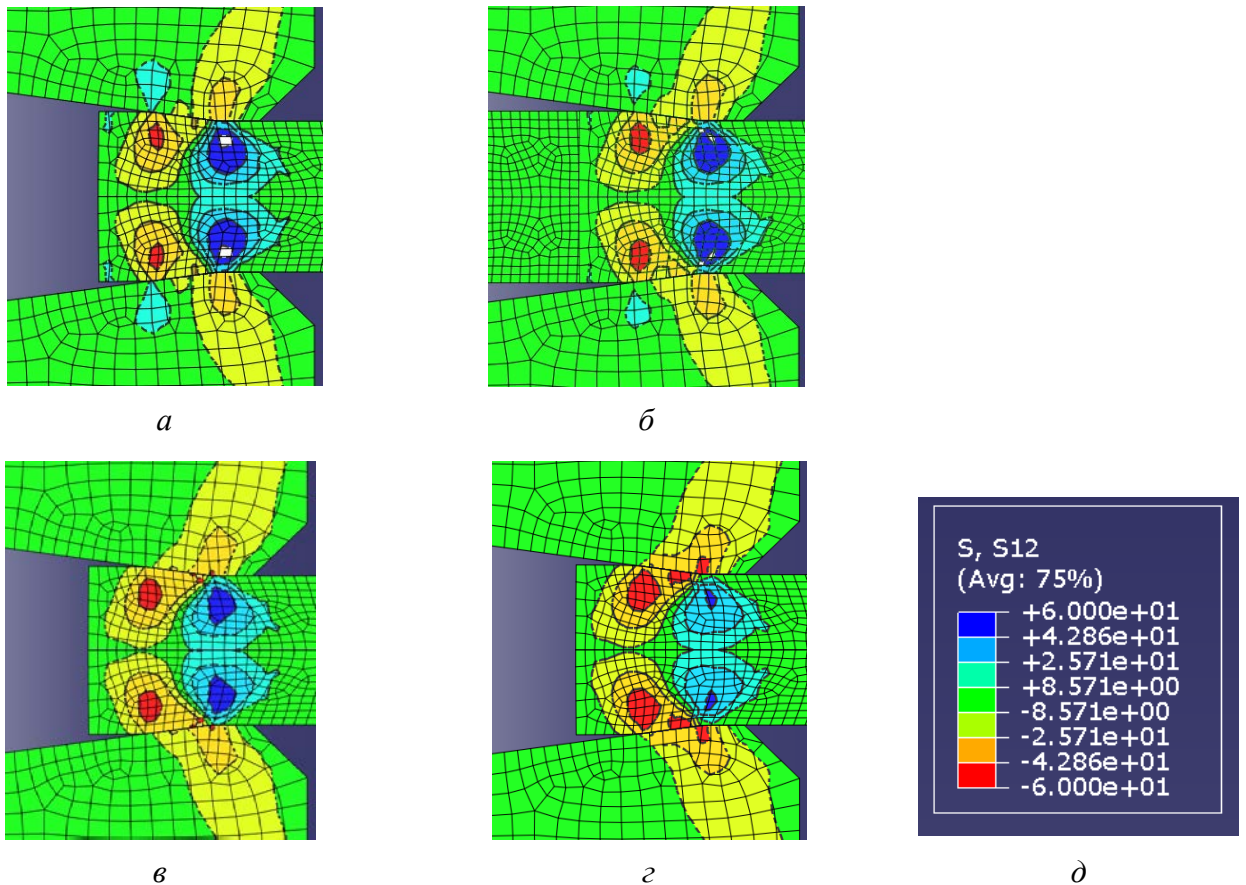


Рисунок 4.5 – Распределение касательных напряжений S_{12} в процессе волочения прутка при различных коэффициентах трения: $a - 0,05$; $б - 0,1$; $в - 0,2$; $г - 0,3$; $д$ – цветовой ключ

Для указанной величины характерно наличие двух знаков – «плюс» и «минус», что соответствует различному направлению деформации сдвига. На входе в очаг деформации наблюдается экстремум напряжений со знаком «минус», а на выходе – со знаком «плюс». При увеличении коэффициента трения зона повышенных касательных напряжений на входе в очаг деформации увеличивается, а на выходе – уменьшается.

Во всех вариантах расчета выявлено четыре экстремума касательных напряжений. Они расположены ближе к контактной поверхности, т. е. в областях, где наблюдается наибольшая плотность. Таким образом, вклад повышенных касательных напряжений в эффект увеличения плотности также не может быть отвергнут.

В работе [78] было показано, что в зависимости от дальнейшего выбранного пути деформации поры могут превращаться в точечные или пространственные дефекты. Можно определить такой сценарий развития деформации, при котором

влияние первоначально заложенных в структуру металла несплошностей окажется минимальным. Такой подход может стать следующей ступенью развития представлений о деформации пористых материалов, в том числе по описанной выше технологической схеме.

4.2 Планирование эксперимента и получение регрессионных зависимостей для оценки уровня механических свойств проволоки из стружки исследуемых сплавов

Первоначально для прогнозирования предполагаемого уровня механических свойств проволоки, получаемой из стружки сплава АД31, решено было использовать методологию полного факторного эксперимента [85]. Уровни варьирования исследуемых параметров процесса деформации для рассматриваемого случая приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Условия эксперимента для волочения проволоки из стружки сплава АД31

Уровень фактора	Накопленная степень деформации ε_{Σ} , %	Скорость волочения v , м/мин
Основной $X_i = 0$	45,5	8
Интервал варьирования Δx_i	29,5	2
Нижний $X_i = -1$	16,0	6
Верхний $X_i = +1$	75,0	10
Кодовые обозначения	X_1	X_2

При выполнении экспериментов для каждой комбинации параметров проводилось по три параллельных опыта. Полученные образцы в зависимости от диаметра рабочего участка подвергали растяжению на универсальных разрывных машинах LFM 400 и LFM 20 с одновременным определением временного сопротивления разрыву σ_b и относительного удлинения δ . В итоге полученные данные представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – План эксперимента для волочения проволоки из стружки сплава АД31

№	X ₁	X ₂	X ₁ X ₂	Параллельные опыты			\bar{y}_j	σ_j^2	\hat{y}_j	$(\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2$
				Y ₁	Y ₂	Y ₃				
Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа										
1	+	+	+	238	237	231	235,3	14,333	234,500	0,694
2	-	+	-	168	174	170	170,7	9,333	167,833	8,028
3	+	-	-	236	234	231	233,7	6,333	234,500	0,694
4	-	-	+	165	163	167	165,0	4,000	167,833	8,028
Σ								34,000	-	17,444
Относительное удлинение δ , %										
1	+	+	+	5,0	5,1	5,0	5,0	0,003	4,967	0,004
2	-	+	-	12,4	13,0	12,6	12,7	0,093	12,467	0,040
3	+	-	-	4,8	4,9	5,0	4,9	0,010	4,967	0,004
4	-	-	+	12,0	12,3	12,5	12,3	0,063	12,467	0,040
Σ								0,170	-	0,089

Проверка воспроизводимости опытов производилась по критерию Кохрена:

– для временного сопротивления разрыву

$$G_0 = \frac{\sigma_{j_{\max}}^2}{\sum_{j=1}^N \sigma_j^2} = \frac{14,333}{34,000} = 0,422 < G_{(0,05;2;4)} = 0,768; \quad (4.1)$$

– для относительного удлинения

$$G_0 = \frac{0,093}{0,170} = 0,549 < G_{(0,05;2;4)} = 0,768.$$

И в том и в другом случае дисперсии однородны, опыты воспроизводимы.

Находим дисперсию воспроизводимости:

– для временного сопротивления разрыву

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum \sigma_j^2}{N} = \frac{34,000}{4} = 8,500; \quad (4.2)$$

– для относительного удлинения

$$\sigma_y^2 = \frac{0,170}{4} = 0,042.$$

Определяем коэффициенты уравнения регрессии:

– для временного сопротивления разрыву

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j = \frac{(235,333 + 170,667 + 233,667 + 165,000)}{4} = 201,167; \quad (4.3)$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{1j} \bar{y}_j = \frac{(235,333 - 170,667 + 233,667 - 165,000)}{4} = 33,333; \quad (4.4)$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{2j} \bar{y}_j = \frac{(235,333 + 170,667 - 233,667 - 165,000)}{4} = 1,833; \quad (4.5)$$

$$b_{12} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{1j} x_{2j} \bar{y}_j = \frac{(235,333 - 170,667 - 233,667 + 165,000)}{4} = -1,000. \quad (4.6)$$

– для относительного удлинения

$$b_0 = \frac{(5,033 + 12,667 + 4,900 + 12,267)}{4} = 8,717;$$

$$b_1 = \frac{(5,033 - 12,667 + 4,900 - 12,267)}{4} = -3,750;$$

$$b_2 = \frac{(5,033 + 12,667 - 4,900 - 12,267)}{4} = 0,133;$$

$$b_{12} = \frac{(5,033 + 12,667 + 4,900 + 12,267)}{4} = -0,067.$$

Проверяем гипотезу о значимости коэффициентов уравнения регрессии с помощью критерия Стьюдента:

– для временного сопротивления разрыву

дисперсия воспроизводимости

$$\sigma_b^2 = \frac{\sigma_y^2}{N \cdot m} = \frac{8,500}{4 \cdot 3} = 0,708; \quad (4.7)$$

табличное значение критерия Стьюдента – $t_{8;0,05} = 2,31$;

$$b_0 = 201,167 > t_{8;0,05} \cdot \sqrt{\sigma_b^2} = 2,31 \cdot \sqrt{0,708} = 1,944; \quad (4.8)$$

$$b_1 = 33,333 > 1,944;$$

$$b_2 = 1,833 < 1,944;$$

$$b_{12} = |-1,000| < 1,944.$$

– для относительного удлинения

$$\sigma_b^2 = \frac{0,042}{4 \cdot 3} = 0,004;$$

$$b_0 = 8,717 > t_{8;0,05} \cdot \sqrt{\sigma_b^2} = 2,31 \cdot \sqrt{0,004} = 0,137;$$

$$b_1 = |-3,750| > 0,137;$$

$$b_2 = 0,133 < 0,137;$$

$$b_{12} = |-0,067| < 0,137.$$

Как для временного сопротивления разрыву, так и для относительного удлинения коэффициенты b_2 и b_{12} получились не значимыми, поэтому уравнения регрессии можно записать в виде:

– для временного сопротивления разрыву

$$\hat{y} = 201,167 + 33,333X_1; \quad (4.9)$$

– для относительного удлинения

$$\hat{y} = 8,717 - 3,750X_1. \quad (4.10)$$

По уравнениям регрессии рассчитываем значения \hat{y}_j и определяем сумму квадратов отклонений $\sum_{j=1}^N (\hat{y}_j - \bar{y}_j)^2$. Результаты расчета заносим в таблицу 4.2, отражающую план эксперимента.

Проверка гипотезы об адекватности полученной математической модели проводится с использованием критерия Фишера:

– для временного сопротивления разрыву

табличное значение критерия Фишера – $F_{2; 8; 0,005} = 4,46$;

дисперсия адекватности

$$\sigma_{ад}^2 = \frac{1}{N - d} \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2 = \frac{17,444}{4 - 2} = 8,722; \quad (4.11)$$

$$F_0 = \frac{\sigma_{\text{ад}}^2}{\sigma_y^2} = \frac{8,722}{8,500} = 1,026 < F_{2;8;0,05} = 4,46; \quad (4.12)$$

– для относительного удлинения

$$\sigma_{\text{ад}}^2 = \frac{0,089}{4-2} = 0,044;$$

$$F_0 = \frac{\sigma_{\text{ад}}^2}{\sigma_y^2} = \frac{0,044}{0,042} = 1,045 < F_{2;8;0,05} = 4,46.$$

Полученные уравнения регрессии адекватны экспериментальным данным.

Далее осуществляется переход от кодированных значений факторов к натуральным:

– для временного сопротивления разрыву

$$\sigma_{\text{в}} = b_0 + b_1 \left(\frac{\varepsilon - X_i}{\Delta x} \right) = 201,167 + 33,333 \left(\frac{\varepsilon - 45,5}{29,5} \right) = 149,755 + 1,130 \cdot \varepsilon; \quad (4.13)$$

– для относительного удлинения

$$\delta = 8,717 - 3,75 \left(\frac{\varepsilon - 45,5}{29,5} \right) = 14,501 + 0,127 \cdot \varepsilon.$$

Таким образом, на основании первоначально проведенных экспериментов были получены регрессионные зависимости при 95 %-ной доверительной вероятности, служащие для предварительной оценки механических свойств. Было установлено, что скорость волочения является незначимым фактором, которым можно пренебречь. При этом использование полученных линейных зависимостей с учетом только одного фактора не дает достаточной точности оценки механических свойств проволоки. В нашем случае целесообразнее применять полиномиальную функцию второго порядка, имеющую вид:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2, \quad (4.14)$$

где x – значение фактора;

$a_0 a_1 a_2$ – коэффициенты регрессии.

Значения коэффициентов регрессии (a_i) находили из решения системы уравнений, полученных по способу наименьших квадратов [86], который является

одним из наиболее распространенных, простых и эффективных методов оценки параметров криволинейных зависимостей. В соответствии с требованиями метода рассматривали следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} n \cdot a_0 + a_1 \cdot \sum x + a_2 \cdot \sum x^2 = \sum y; \\ a_0 \cdot \sum x + a_1 \cdot \sum x^2 + a_2 \cdot \sum x^3 = \sum x \cdot y; \\ a_0 \cdot \sum x^2 + a_1 \cdot \sum x^3 + a_2 \cdot \sum x^4 = \sum x^2 \cdot y, \end{cases} \quad (4.15)$$

где n – количество независимых опытов.

В качестве исходных данных использовались значения прочностных и пластических свойств проволоки, полученные в ходе экспериментальных исследований образцов на растяжение, отобранных при волочении прутка, изготовленного дискретным прессованием из стружки сплава АД31. Волочение осуществляли на цепном волочильном стане усилием 50 кН (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – Общий вид цепного волочильного стана

Полученные экспериментальные данные представлены в таблице 4.3. Величину степени деформации ε , %, при которой производили испытание образца, оценивали показателем

$$\varepsilon = \frac{d_0^2 - d^2}{d_0^2} \cdot 100 \%, \quad (4.16)$$

где d_0 – диаметр прутка после прессования, мм; d – диаметр проволоки после определенного этапа волочения, мм.

Таблица 4.3 – Экспериментальные данные, полученные в ходе волочения прессованного прутка диаметром 6 мм из стружки сплава АД31

№	x	y	x ²	x ² y	x ³	x ⁴	y ²	x · y	\hat{y}_i	$y_i - \hat{y}_i$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа											
1	0,0	131	0,0	0,0	0,0	0,0	17161	0,0	132,9	-1,943	3,77659
2	16,0	168	255,1	42858,8	4074,7	65082,1	28224	2683,3	164,9	3,112	9,68751
3	30,6	190	933,6	177392,0	28527,9	871687,3	36100	5805,6	189,1	0,877	0,76945
4	43,8	207	1914,1	396210,9	83740,2	3663635,2	42849	9056,2	207,0	0,006	0,00004
5	55,6	215	3086,4	663580,2	171467,8	9525986,9	46225	11944,4	219,7	-4,718	22,25975
6	66,0	230	4352,3	1001036,8	287133,1	18942812,2	52900	15173,6	228,4	1,617	2,61335
7	75,0	235	5625,0	1321875,0	421875,0	31640625,0	55225	17625,0	234,0	1,049	1,10073
Σ	286,8	1376	16166,6	3602953,8	996818,8	64709828,7	278684	62288,2	1376,0	0,000	40,20731
Относительное удлинение δ , %											
1	0,0	15,8	0,0	0,0	0,0	0,0	249,6	0,0	15,8	-0,036	0,0013
2	16,0	12,5	255,1	3188,9	4074,7	65082,1	156,3	199,7	12,5	0,008	0,0001
3	30,6	10,0	933,6	9336,4	28527,9	871687,3	100,0	305,6	9,9	0,089	0,0079
4	43,8	8,0	1914,1	15312,5	83740,2	3663635,3	64,0	350,0	8,0	0,034	0,0012
5	55,6	6,5	3086,4	20061,7	171467,8	9525986,9	42,3	361,1	6,5	-0,038	0,0015
6	66,0	5,3	4352,3	23067,4	287133,2	18942812,2	28,1	349,7	5,5	-0,224	0,0504
7	75,0	5,0	5625,0	28125,0	421875,0	31640625,0	25,0	375,0	4,8	0,168	0,0282
Σ	286,8	63,1	16166,6	99091,9	996818,8	64709828,7	665,2	1941,0	63,1	0,000	0,0904

Далее приведен последовательный расчет коэффициентов корреляции:

– для временного сопротивления разрыву

суммы квадратов

$$S_{xx} = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} = 16166,6 - \frac{286,8^2}{7} = 4415,5; \quad (4.17)$$

$$S_{yy} = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} = 278684 - \frac{1376^2}{7} = 8201,7; \quad (4.18)$$

$$S_{xy} = \sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n} = 62288,2 - \frac{286,8 \cdot 1376}{7} = 5910,4; \quad (4.19)$$

расчетное значение коэффициента корреляции

$$r_0 = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} = \frac{5910,4}{\sqrt{4415,5 \cdot 8201,7}} = 0,982; \quad (4.20)$$

– для относительного удлинения

суммы квадратов

$$S_{xx} = 16166,6 - \frac{286,8^2}{7} = 4415,5;$$

$$S_{yy} = 665,2 - \frac{63,1^2}{7} = 96,4;$$

$$S_{xy} = 1941,0 - \frac{286,8 \cdot 63,1}{7} = -644,4;$$

расчетное значение коэффициента корреляции

$$r_0 = \frac{-644,0}{\sqrt{4415,5 \cdot 96,4}} = -0,987.$$

Проверка коэффициента корреляции

– для временного сопротивления разрыву

$$r_0 = 0,982 > r_{5; 0,01} = 0,875;$$

– для относительного удлинения

$$r_0 = |-0,987| > r_{5; 0,01} = 0,875.$$

Полученные значения коэффициентов корреляции обладают высокой степенью значимости.

При решении системы уравнений (4.15) матричным методом были определены коэффициенты уравнений (4.14) для временного сопротивления разрыву и относительного удлинения, в результате чего конечные уравнения приобрели вид:

– для временного сопротивления разрыву

$$\sigma_b = 132,9 + 2,177 \cdot \varepsilon - 0,011 \cdot \varepsilon^2; \quad (4.21)$$

– для относительного удлинения

$$\delta = 15,8 - 0,226 \cdot \varepsilon + 0,001 \cdot \varepsilon^2. \quad (4.22)$$

По аналогии с приведенными выше рассуждениями были определены уравнения для оценки временного сопротивления разрыву и относительного

удлинения при волочении проволоки, полученной из стружки сплава АК12:

– для временного сопротивления разрыву

$$\sigma_B = 167,2 + 2,747 \cdot \varepsilon - 0,016 \cdot \varepsilon^2; \quad (4.23)$$

– для относительного удлинения

$$\delta = 14,4 - 0,272 \cdot \varepsilon + 0,002 \cdot \varepsilon^2. \quad (4.24)$$

Погрешность расчетов по приведенным выше формулам для стружки обоих сплавов не превышает 5 % при сравнении их с соответствующими экспериментальными данными.

В качестве иллюстрации на рисунке 4.7 отражено изменение прочностных (σ_B) и пластических (δ) свойств холоднотянутой проволоки (экспериментальные значения совместно с графиками, построенными по приведенным выше уравнениям регрессии (4.21) и (4.22)), исходной заготовкой для которой служили прутки диаметром 6 мм из холоднобрикетированной стружки.

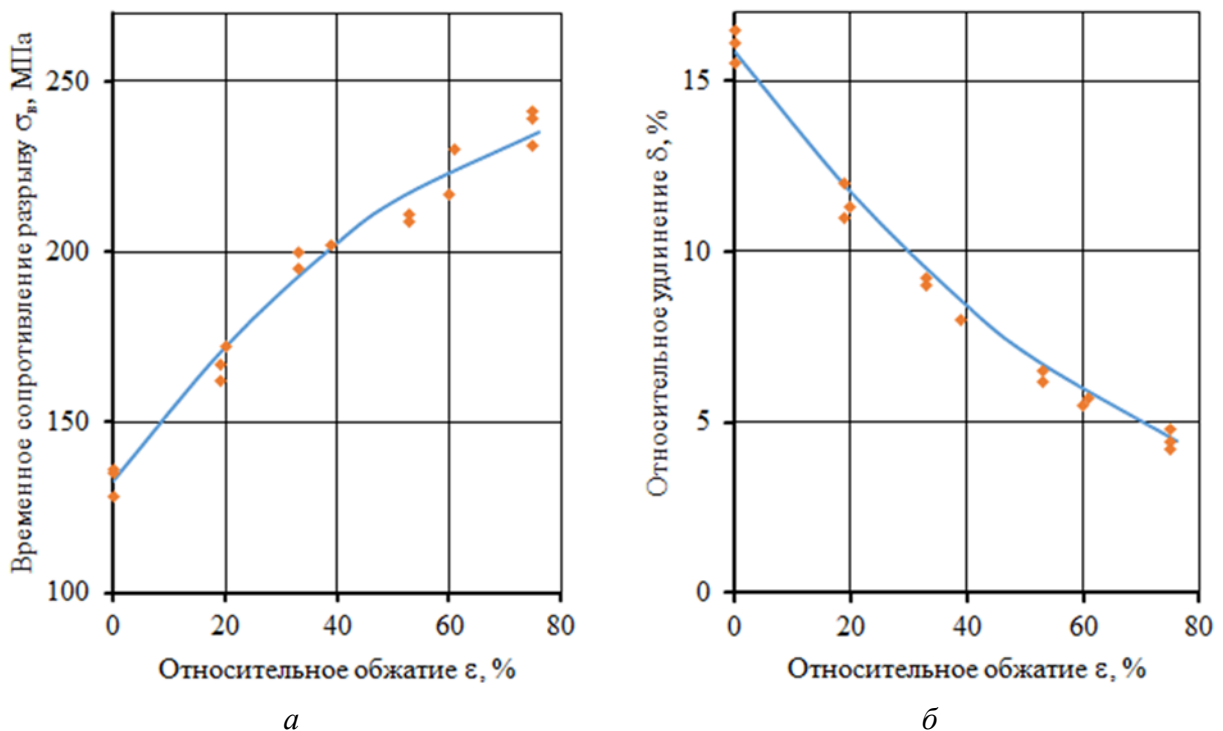


Рисунок 4.7 – Зависимости временного сопротивления разрыву (а) и относительного удлинения (б) от суммарной степени деформации прутков и проволоки из холоднобрикетированной стружки сплава АД31 после горячего прессования ($\varepsilon = 0$) и холодного волочения

В результате прочность проволоки на конечных размерах $d_{\min} = 3,0$ мм достигает значений порядка $\sigma_B = 230 \div 240$ МПа. При этом пластичность снижается до уровня, соответствующего значениям $\delta = 4 \div 5$ %.

4.3 Экспериментальные исследования процесса волочения прутков из стружки сплава АД31, полученных с использованием других вариантов комбинирования процессов брикетирования и прессования

Предварительно перед волочением полученных по разным схемам прутков с использованием приведенной выше зависимости временного сопротивления разрыву от степени деформации были определены базовые технологические и энергосиловые параметры процесса волочения, включая коэффициент запаса прочности (таблица 4.4). За основу был принят маршрут волочения: 6,0 мм → 5,5 → 5,1 → 4,7 → 4,35 → 4,1 → 3,75 → 3,4 → 3,0 мм. Предварительный и промежуточные отжиги при этом не были предусмотрены. Сила волочения рассчитывалась по методике А.П. Гавриленко [87].

Таблица 4.4 – Технологические и энергосиловые параметры процесса волочения проволоки, полученной из стружки сплава АД31

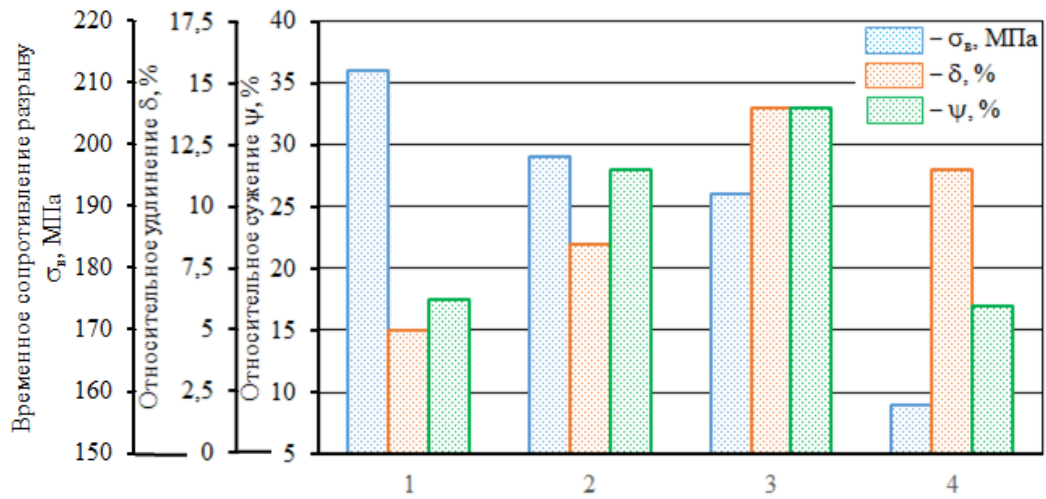
Параметры процесса волочения	Номер перехода							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Начальный диаметр D_i , мм	6	5,5	5,1	4,7	4,35	4,1	3,75	3,4
Конечный диаметр D_{i-1} , мм	5,5	5,1	4,7	4,35	4,1	3,75	3,4	3
Начальная площадь поперечного сечения F_i , мм ²	28,3	23,7	20,4	17,3	14,9	13,2	11,0	9,1
Конечная площадь поперечного сечения F_{i-1} , мм ²	23,7	20,4	17,3	14,9	13,2	11,0	9,1	7,1
Коэффициент вытяжки μ	1,19	1,16	1,18	1,17	1,13	1,20	1,22	1,28
Суммарное относительное обжатие ε_{Σ} , %	16,0	27,8	38,6	47,4	53,3	60,9	67,9	75,0
Начальное сопротивление деформации $\sigma_{s(i)}$, МПа	135	165	185	201	211	218	225	230
Конечное сопротивление деформации $\sigma_{s(i-1)}$, МПа	165	185	201	211	218	225	230	234
Среднее сопротивление деформации $\sigma_{s(ср)}$, МПа	150	175	193	206	215	221	227	232
Сила волочения P_v , кН	1,21	1,00	1,02	0,88	0,61	0,82	0,76	0,80
Напряжение волочения K_v , МПа	51	49	59	59	46	74	84	113
Коэффициент запаса прочности γ_3	3,0	3,6	3,3	3,5	4,6	3,0	2,7	2,1

Далее в работе проводилось практическое волочение прутков, полученных с использованием различных вариантов реализации процесса прессования, отличительные признаки которых рассматривались выше (рисунок 2.8).

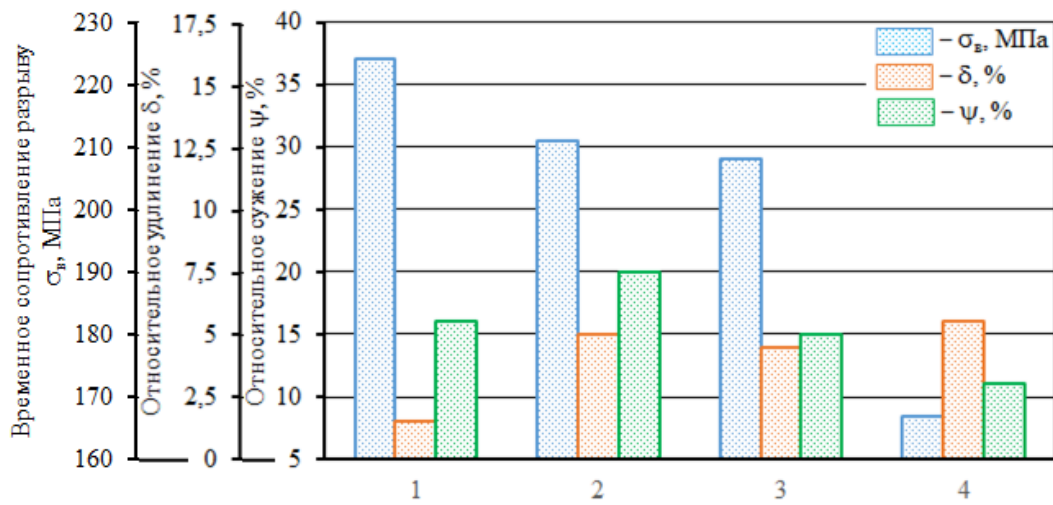
Для отслеживания изменения механических характеристик проволоки в ходе волочения в каждом случае на отдельных диаметрах осуществлялся отбор соответствующих образцов (по 3 шт. на каждый диаметр). Определение временного сопротивления разрыву σ_b , относительного удлинения δ и относительного сужения ψ осуществлялось путем растяжения либо специально подготовленных гантелеобразных образцов, либо просто фрагментов проволоки на универсальной испытательной машине LFM-10.

Сравнение достигнутых механических характеристик производили на холоднодеформированной проволоке диаметром 4,7 мм (суммарное относительное обжатие ε составляло 39 %), диаметром 4,1 мм ($\varepsilon = 53$ %) и диаметром 3,0 мм ($\varepsilon = 75$ %). Результаты проведенных механических испытаний в виде соответствующих диаграмм представлены на рисунке 4.8. Их сравнительный анализ свидетельствует о том, что существенных отличий в свойствах проволоки, изготовленной волочением из прутков, полученных с использованием приведенных выше вариантов осуществления процесса прессования, не наблюдается.

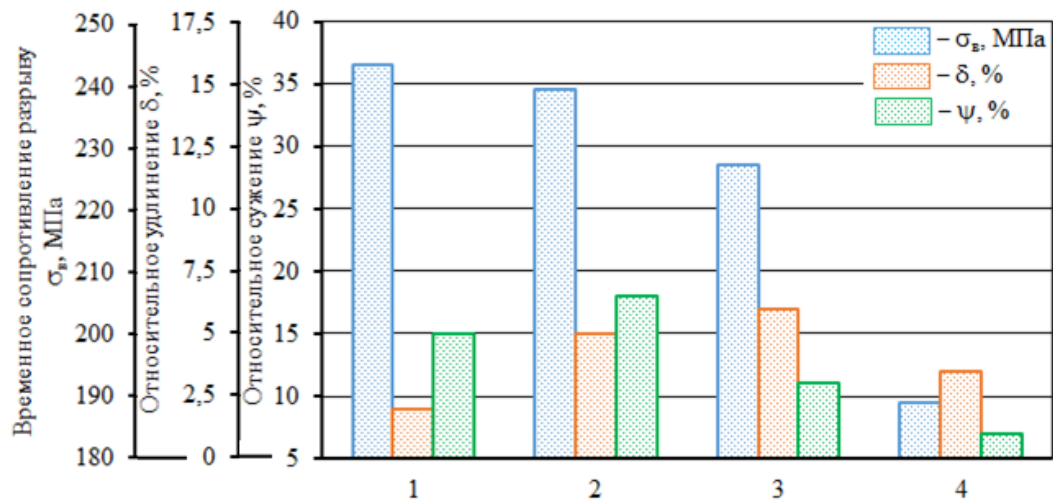
Исключение составляет проволока, изготовленная по варианту 4 (рисунок 2.8), у которой, независимо от диаметра, прочностные и пластические свойства заметно ниже, чем у трех других. Это можно объяснить тем, что перенос нагретой стружки от отдельно стоящей печи к прессу, засыпка ее в разогретую до определенной температуры инструментальную оснастку, сборка ее и включение привода перемещения подвижного пуансона требуют значительных временных затрат. В результате происходят неизбежные потери тепла и температурные условия осуществления процесса прессования будут несколько отличаться от трех других случаев, которые фактически характеризуются изотермическими условиями протекания процесса.



а



б



в

Рисунок 4.8 – Сравнительные диаграммы механических характеристик проволоки из стружки сплава АД31 в зависимости от способа осуществления горячего прессования и суммарного относительного обжатия при волочении: а – диаметр 4,7 мм ($\epsilon = 39\%$); б – диаметр 4,1 мм ($\epsilon = 53\%$); в – диаметр 3,0 мм ($\epsilon = 75\%$)

При этом вариант 4 по производительности можно считать наиболее привлекательным, поскольку общее время цикла прессования в этом случае будет наименьшим. Что касается реализации первых трех вариантов, то наибольшей прочностью и, соответственно, наименьшей пластичностью обладает проволока, полученная с использованием в технологической схеме отдельно проводимой операции горячего брикетирования стружки, осуществляемой при температуре нагрева пресс-формы $420\text{ }^{\circ}\text{C}$, давлении брикетирования 200 МПа и времени выдержки под давлением 5 мин . Особенно заметно это проявляется при небольших суммарных относительных обжатиях (до 40%). С повышением степени деформации и, соответственно, уменьшением диаметра проволоки эта разница постепенно нивелируется, выравниваясь, например, при $\varepsilon = 75\%$ практически полностью и по прочности, и по пластичности.

Для сравнения в работе также проводилось холодное волочение прутков из стружки сплава АД31, изготовленных методом совмещенной прокатки-прессования. Процесс получения проволоки конечным диаметром 1 мм также как и в предыдущем случае осуществляли на цепном волочильном стане усилием 50 кН без проведения промежуточных отжигов со средним обжатием $\varepsilon_{\text{ср}} = 15\div 20\%$. Внешний вид фрагментов тянутой проволоки разного диаметра показан на рисунке 4.9.

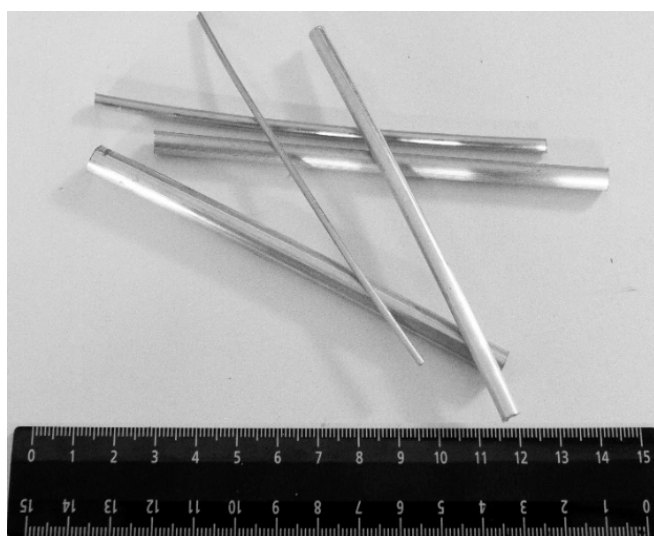


Рисунок 4.9 – Фрагменты проволоки разного диаметра, полученной из стружки сплава АД31

При этом после СПП отпрессованные прутки подвергали предварительному отжигу при температуре 350 °С в течение часа. Ниже приведен реализованный маршрут волочения, начиная с диаметра 9 мм: 9,0 мм → 7,5 → 7,0 → 6,6 → 6,0 → 5,46 → 4,96 → 4,35 → 3,7 → 3,3 → 2,8 → 2,4 → 2,06 → 1,7 → 1,48 → 1,25 → 1,0 мм.

Для данного случая решено было производить параллельный отбор образцов как для проведения металлографических исследований, так и для оценки механических характеристик, который, как и ранее, осуществлялся на некоторых промежуточных диаметрах. Величину деформации к этому моменту оценивали показателем ε , рассчитываемым по формуле (4.16).

Было установлено (рисунок 4.10), что тенденция изменения микроструктуры поперечного сечения проволок, полученных с различной величиной обжатия из прутков как диаметром 7 мм, так и диаметром 9 мм, с увеличением относительного обжатия в общем-то идентичная, т. е. по мере уменьшения диаметра протянутой проволоки происходит измельчение структуры с постепенно усиливающейся раздробленностью в приповерхностных слоях проволоки.

Это связано с неравномерностью распределения деформации по сечению проволоки при волочении, когда деформированию в большей степени подвергаются слои, контактирующие с волокой. При этом в приповерхностных слоях проволоки происходит диспергирование окисной пленки, которое наряду с утонением структуры должно положительно сказываться на формировании свойств полученной продукции. Существенное влияние на это не должны оказывать и прослеживаемые на некоторых представленных структурах отдельные дефекты в виде нарушения сплошности. Они носят случайный характер, не связанный с реализацией предложенной технологической схемы.

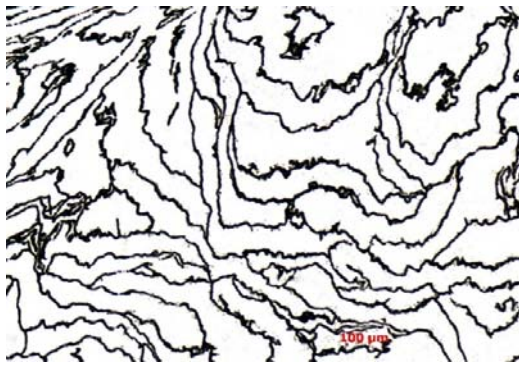
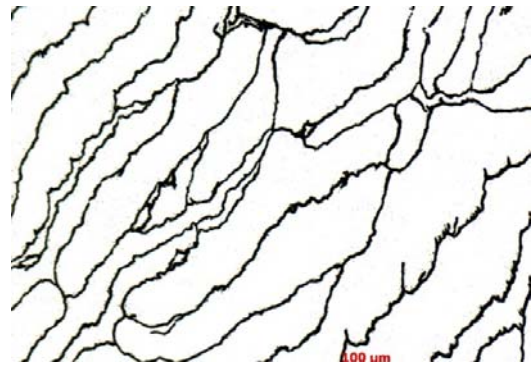
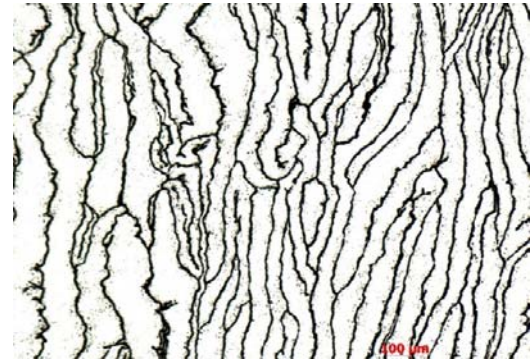
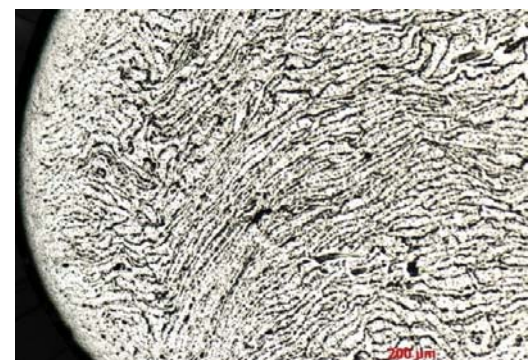
*a**б**в**г**д**е**ж**з*

Рисунок 4.10 – Микроструктура поперечного сечения проволоки разного диаметра (*a, б* – 6,0 мм; *в, г* – 3,7 мм; *д, е* – 2,8 мм; *ж, з* – 1,0 мм), полученной из прутков диаметром 7 мм (*a, в, д, ж*) и 9 мм (*б, г, е, з*), ($\times 160$)

Оценка механических характеристик полученной проволоки производилась путем испытания ее на растяжение с определением временного сопротивления разрыву σ_b , относительного удлинения δ и относительного сужения ψ . Результаты испытаний приведены на рисунке 4.11, причем точками отмечены средние для пяти испытанных образцов значения указанных характеристик.

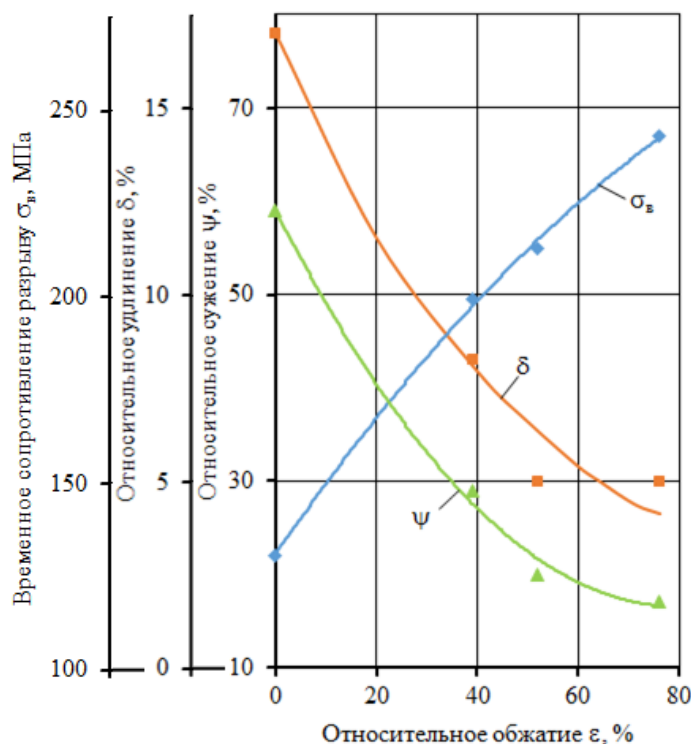


Рисунок 4.11 – Изменение механических характеристик полуфабрикатов из стружки сплава АД31 после отжига полученного СПП прутка ($\epsilon = 0$) и холодного волочения

Практическим применением длинномерных деформированных полуфабрикатов из стружковых отходов сплава АД31, по-видимому, является использование их в качестве основы для введения в соответствующие расплавы специальных порошковых добавок модифицирующего назначения. Также проволока, полученная из стружки указанного сплава, может использоваться для изделий ширпотреба (без особых требований к структуре), в частности, обвязочной проволоки неответственного назначения. Для такой продукции механические характеристики строго не регламентированы, однако имеются

технологические рекомендации, которые устанавливают следующий уровень прочностных свойств такой проволоки в твердом (неотожженном) состоянии: временное сопротивление разрыву проволоки должно быть не ниже $140 \div 160$ МПа, а относительное удлинение – не ниже $2 \div 3$ %.

4.4 Применение процесса волочения отпрессованных полуфабрикатов из стружки сплава АК12 для получения прутково-профильной продукции различного назначения

Волочение прутков, полученных из стружки сплава АК12 методом дискретного прессования, как и ранее, осуществляли на цепном волочильном стане усилием 50 кН. Среднее единичное обжатие при волочении составляло $15 \div 20$ %, а при проведении промежуточных отжигов использовали режим: температура отжига $\theta_{отж} = 400$ °С, время выдержки $\tau_{отж} = 1$ ч. Применяли следующие маршруты волочения, с учетом предварительно рассчитанных значений коэффициента запаса прочности:

– первый маршрут: диаметр 8,0 мм \rightarrow 7,5 \rightarrow 7,2 \rightarrow 6,6 \rightarrow 6,0 \rightarrow 5,5 \rightarrow 5,0 \rightarrow 4,35 \rightarrow 3,85 \rightarrow 3,3 \rightarrow 2,8 \rightarrow 2,4 \rightarrow 2,0 мм.

– второй маршрут: диаметр 6,0 мм \rightarrow 5,5 \rightarrow 5,0 \rightarrow 4,35 \rightarrow 3,85 \rightarrow 3,3 \rightarrow 2,8 \rightarrow 2,4 \rightarrow 2,1 \rightarrow 1,7 \rightarrow 1,5 \rightarrow 1,2 мм.

Анализ выполненных исследований механических свойств полученных прутков и проволоки позволил заключить следующее. В горячепрессованном состоянии механические свойства материала не зависят от принятого в работе изменения коэффициента вытяжки при прессовании, т. е. находятся примерно на одном уровне. При последующем холодном волочении прочность проволоки, как и следовало ожидать, возрастала, а пластичность, наоборот, снижалась (рисунок 4.12).

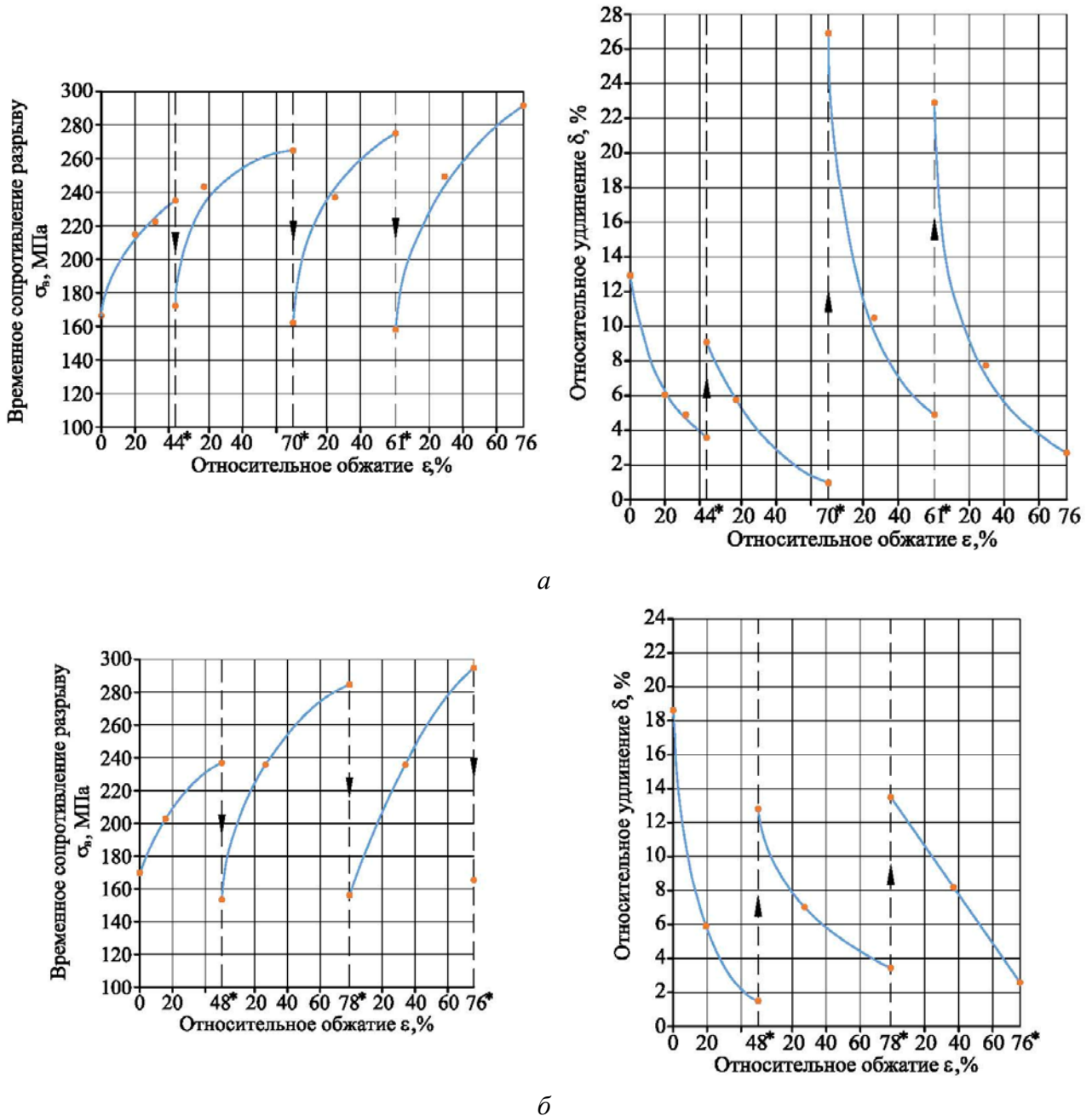


Рисунок 4.12 – Изменение временного сопротивления разрыву σ_b и относительного удлинения δ проволоки из сплава АК12 при волочении с промежуточными отжигами (места проведения отжигов обозначены*): *a* – волочение с диаметра 8 мм на диаметр 2 мм (первый маршрут), *б* – волочение с диаметра 6 мм на диаметр 1,2 мм (второй маршрут)

Установлено, что для горячепрессованного состояния критической степенью деформации, превышение которой при волочении приводило к обрыву проволоки, следует считать уровень суммарного относительного обжатия, составляющий порядка 40÷45 %. Последующий отжиг способствовал снятию наклепа и восстановлению пластичности материала, а ресурс деформируемости проволоки возрастал до 75÷80 %. Было выявлено, что характер изменения

механических свойств проволоки после отжига и последующей холодной деформации практически повторяет предыдущую зависимость. Из этого следует, что варьированием суммарной степени деформации при волочении и местом проведения отжига по определенному режиму в принципе можно получать проволоку любого диаметра с требуемым сочетанием прочности и пластичности. Поскольку, как уже говорилось выше, характер изменения механических свойств прутков диаметром 6 и 8 мм при последующем волочении принципиальных отличий не имеет, можно предположить, что существуют своего рода «единые» кривые $\sigma_b = f(\varepsilon)$ и $\delta = f(\varepsilon)$ для данной категории материала при холодной обработке.

Для их построения все экспериментальные значения временного сопротивления разрыву σ_b и относительного удлинения проволоки δ различного диаметра были нанесены, в соответствии со своими значениями относительного обжатия ε , на единое поле указанных зависимостей совместно с графиками, отражающими полученные ранее уравнения регрессии (4.23) и (4.24) (рисунок 4.13).

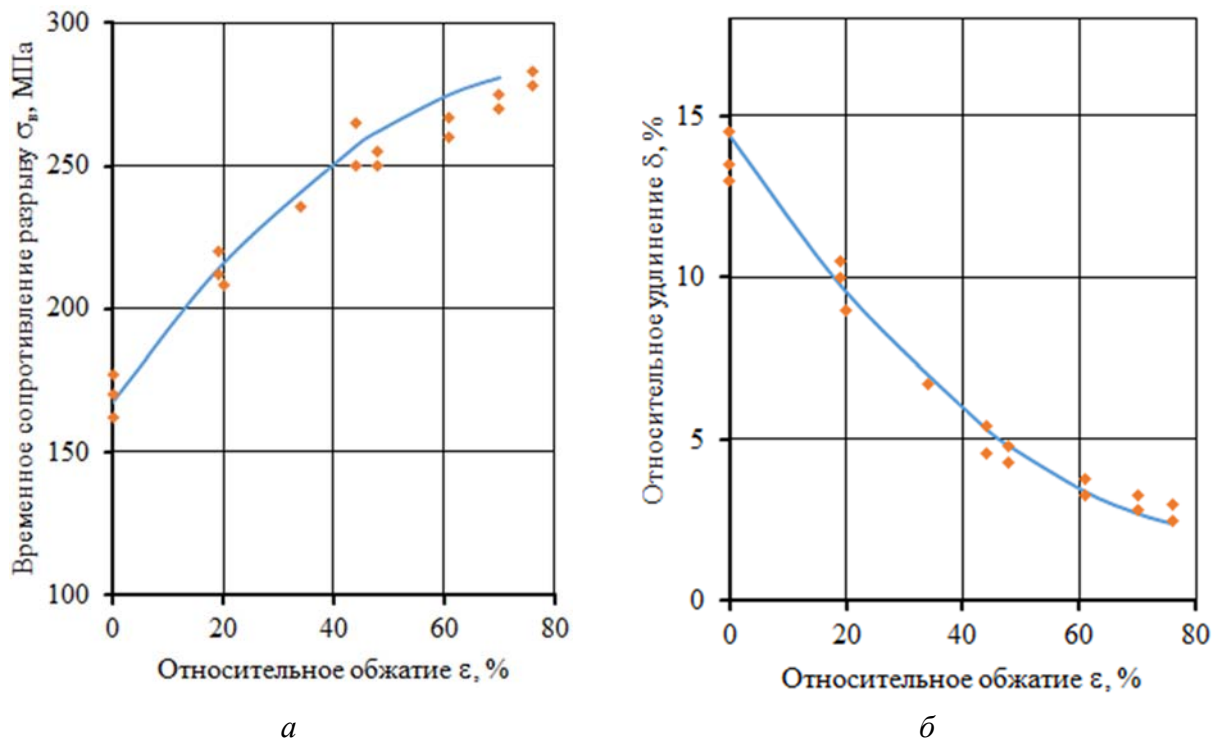


Рисунок 4.13 – Изменение временного сопротивления разрыву (*a*) и относительного удлинения (*б*) прутков и проволоки из стружки сплава АК12 после горячего прессования ($\varepsilon = 0\%$) и холодного волочения

В интервале относительных обжатий до 80 % прочность проволоки на конечных размерах может достигать значений $\sigma_B = 280 \div 290$ МПа, а пластичность снижается до $\delta = 3 \div 4$ %. При этом важно обеспечить требуемое структурное состояние материала, достигаемое холодной обработкой.

Изучение структуры производилось на проволоке диаметрами 6,6 и 5,0 мм, каждая из которых была протянута из соответствующих отпрессованных прутков определенного диаметра с суммарным относительным обжатием 30 %. Анализ приведенных на рисунке 4.14 микроструктур показывает, что по мере уменьшения диаметра проволоки происходит хоть и не совсем равномерное по длине, но достаточно заметное измельчение кремния. Границы между отдельными стружками практически не проявляются, т. е. фактически имеем однородный сплошной материал, представляющим собой равномерно распределенную кремнистую фазу по телу α -твердого раствора алюминия. Строчечность структуры в продольном направлении выражена уже в меньшей степени, чем у прутков после горячего прессования.

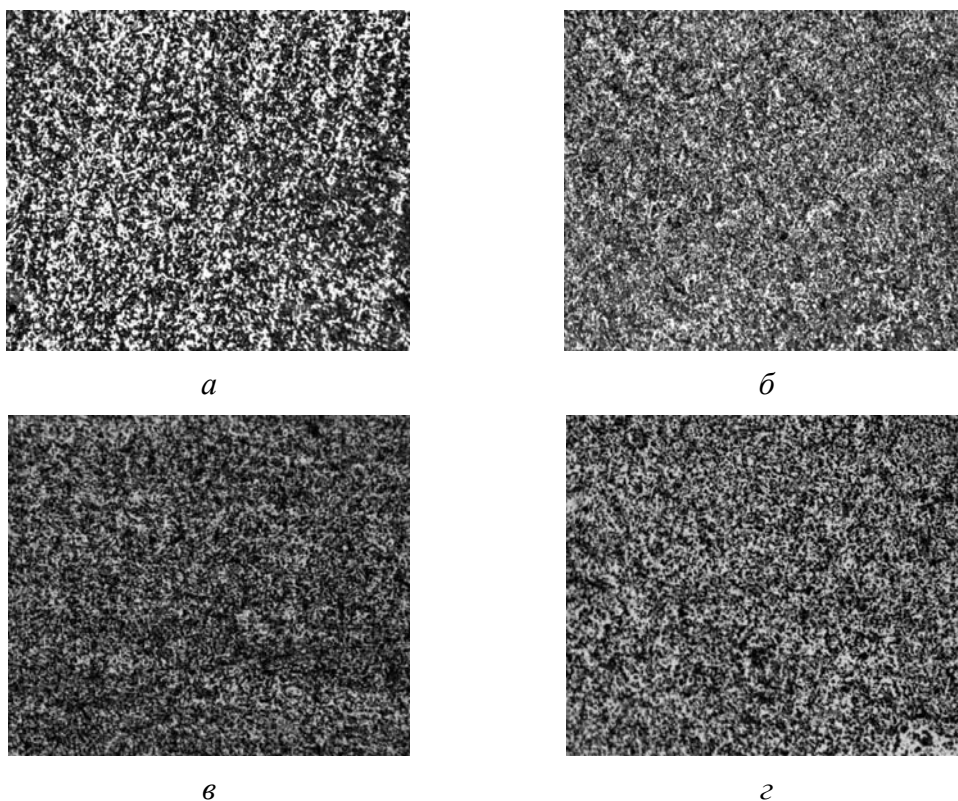


Рисунок 4.14 – Характерные микроструктуры ($\times 320$) проволоки диаметрами 5 мм (а, б) и 6,6 мм (в, г), полученных из отпрессованных прутков диаметрами, соответственно, 6 и 8 мм: а, в – продольное сечение; б, г – поперечное сечение

Сравнение механических свойств проволоки, полученной по предлагаемой технологии, с проволокой, близкой по химическому составу с литейным алюминиевым сплавом АЛ2, показало, что деформированный полуфабрикат из проволоки сплава АК12 в отожженном состоянии по прочности практически не уступает сплаву АЛ2, а по пластичности превышает его приблизительно в три раза. Последнее обстоятельство представляет особый интерес и может значительно расширить область применения продукции из стружки.

Холодное волочение отпрессованного прутка диаметром 7 мм, изготовленного методом совмещенной прокатки-прессования (см. главу 3), для получения проволоки минимально возможного диаметра также проводилось на цепном волочильном стане усилием 50 кН со средним обжатием $\varepsilon_{\text{ср}} = 10 \div 15 \%$. После получения заготовки диаметром 6 мм был проведен промежуточный отжиг при температуре $\theta_{\text{отж}} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение часа, а далее следовало волочение проволоки до диаметра 2,5÷3,0 мм.

При составлении маршрута волочения учитывалось, что кремний не образует с алюминием химических соединений и присутствует в сплавах алюминия лишь в элементарном виде. Имея переменную растворимость, кремний в то же время не влияет на способность алюминия к деформационному упрочнению, что связано с неблагоприятным характером распада твердого раствора алюминия. Присутствуя в алюминии, кремний только несколько упрочняет его, незначительно снижая при этом пластические свойства.

Для отслеживания уровня механических характеристик проволоки в ходе волочения и параллельного исследования характера изменения ее микроструктуры по мере уменьшения диаметра осуществлялся отбор соответствующих образцов. Сообщаемая проволоке к этому моменту величина деформации оценивалась показателем ε , определяемым по формуле (4.16)

На рисунке 4.15 приведен график изменения прочностных ($\sigma_{\text{в}}$) и пластических (ψ) характеристик холоднотянутой проволоки, исходной заготовкой для которой служил отожженный прутки диаметром 6 мм. Анализ этих графиков

показывает, что в интервале суммарных относительных обжатий до 80 % прочность проволоки на конечных размерах $d_{\min} = 2,5 \div 3,0$ мм может достигать значений $\sigma_B = 185 \div 195$ МПа.

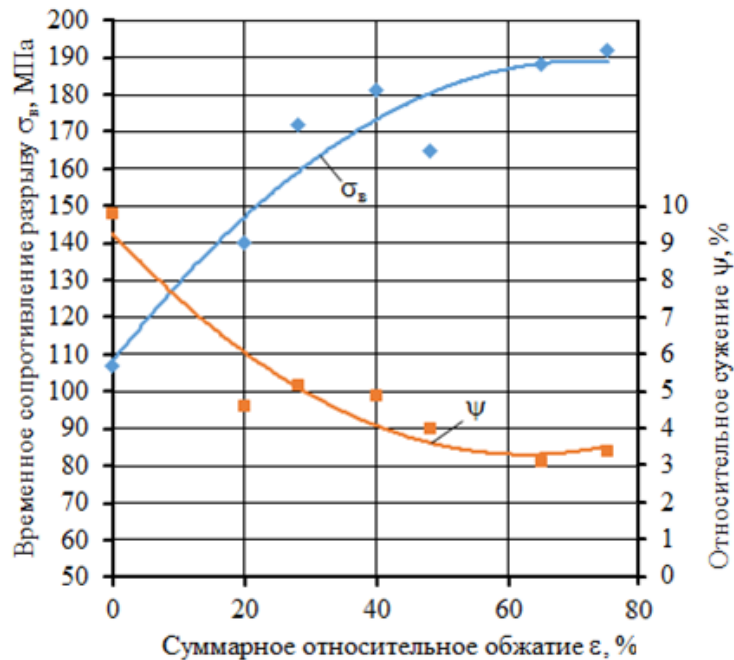


Рисунок 4.15 – Изменение механических характеристик проволоки из стружки АК12 в зависимости от суммарного относительного обжатия ϵ

При этом относительное удлинение δ , характеризующее пластичность, снижается фактически до нулевых значений, а относительное сужение ψ (шейка в месте разрыва практически не формируется) составляет порядка 2÷4 %. Отсюда можно сделать вывод о том, что осуществляемая предварительная горячая деформация играет важную роль в формировании относительно высоких показателей механических характеристик. Поэтому отдельных случаях целесообразнее получение промежуточного продукта именно методом СПП, в том числе и при изготовлении прутков небольшого диаметра, чтобы не прибегать к приемам холодной обработки. Однако, если необходимо получить проволоку сравнительно небольшого диаметра, для которой существуют определенные ограничения по нижнему значению прочности и пластичности, то можно использовать процесс волочения. Последний вывод является важным, поскольку для литейного сплава совсем не очевидна возможность реализации такого

процесса, как волочение, в котором отмечается высокий уровень растягивающих напряжений, способных разрушить металл.

Изучение структуры производилось на проволоке диаметрами 5,1; 4 и 3 мм, каждая из которых была протянута с определенным суммарным относительным обжатием, составляющим, соответственно, 28, 56 и 75 %.

Анализ приведенных на рисунке 4.16 микроструктур показывает, что по мере уменьшения диаметра проволоки происходит хоть и не совсем равномерное по длине, но достаточно заметное измельчение кремния.

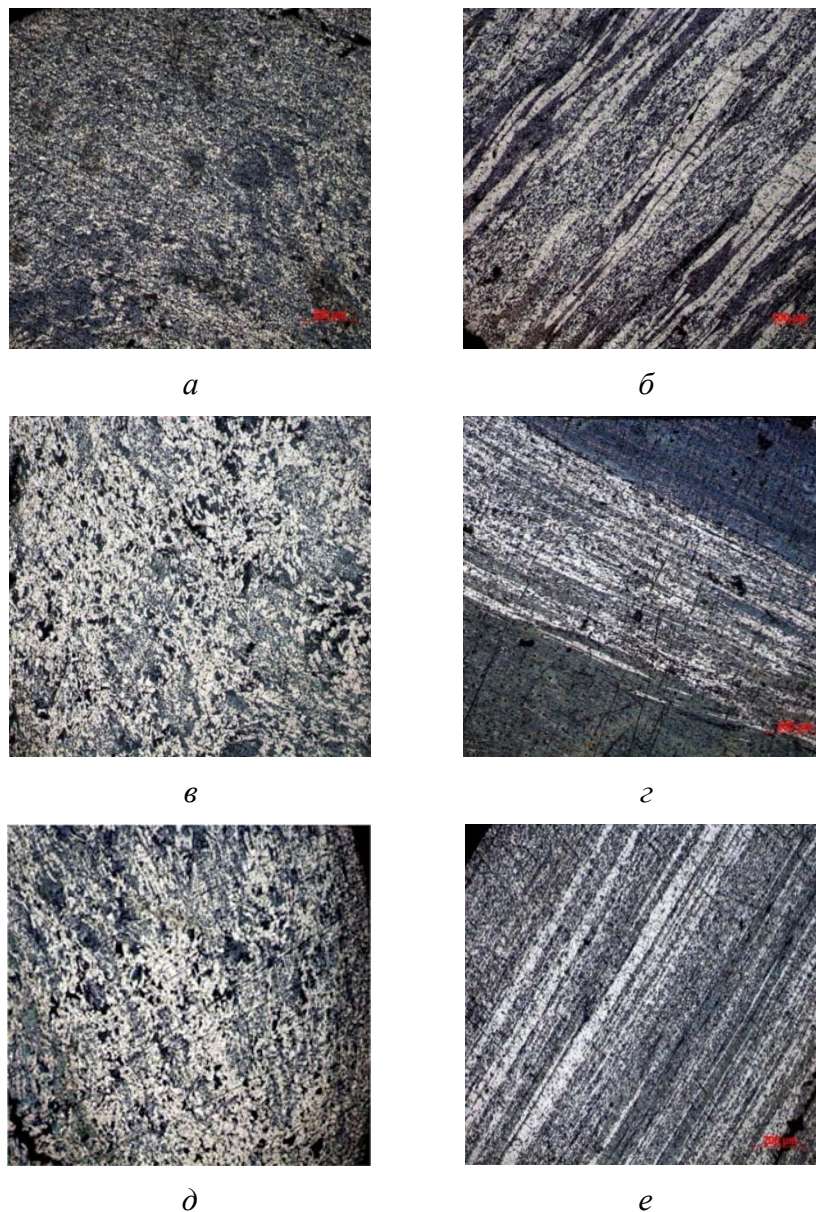


Рисунок 4.16 – Микроструктура проволоки разных диаметров в поперечном (*a, в, д*) и продольном (*б, з, е*) сечениях, $\times 100$: *a, б* – диаметр 5,1 мм ($\epsilon_{\Sigma} = 28\%$); *в, з* – диаметр 4,0 мм ($\epsilon_{\Sigma} = 56\%$); *д, е* – диаметр 3,0 мм ($\epsilon_{\Sigma} = 75\%$)

Границы между отдельными стружками практически не проявляются, то есть фактически материал имеет однородную сплошную структуру, представляющую равномерно распределенную кремнистую фазу по телу α -твердого раствора алюминия. Строчечность структуры в продольном направлении выражена уже в меньшей степени, чем у прутков после СПП.

Таким образом, проведенные механические испытания и металлографические исследования прутково-проволочной продукции из стружки силумина позволили установить особенности формирования их структуры и свойств, обеспечивающие более высокий уровень прочностных и пластических свойств, чем это характерно для силумина в литом состоянии. За счет комбинирования величины степени деформации при холодном волочении и места проведения отжига можно добиться такого сочетания прочностных и пластических свойств материала, которые будут служить основой для выбора технологических режимов получения продукции конкретного функционального назначения [54].

4.5 Некоторые практические приложения результатов исследований

Для практического использования полученных прутков и проволоки из сплава АК12 исследовали два потенциальных варианта их применения:

- в качестве модификатора при литье под низким давлением дисков автомобильных колес на предприятии ООО «КиК» (г. Красноярск);
- в качестве сварочной проволоки для пайки конструкций специального назначения из алюминиевых сплавов на ОАО «Информационные спутниковые системы» (г. Железногорск).

Для первого варианта использовали технологическую схему (рисунок 2.1), в соответствии с которой выполнены экспериментальные исследования по получению лигатурных прутков и определена их модифицирующая способность [42, 88].

Температурно-скоростной режим осуществления данной операции соответствовал параметрам, рекомендуемым для прессования прутков из труднодеформируемых алюминиевых сплавов, т. е. когда температура нагрева

заготовки $\theta = 450 \div 480$ °С, скорость прессования $v_{пр} = 50 \div 100$ мм/с [43]. Для обеспечения изотермических условий деформирования, в экспериментах брикеты с нанесенной на все контактные поверхности смазкой нагревали вместе с инструментальной оснасткой.

После экструзии у полученных прутков отделяли передний слабдеформированный конец длиной порядка 100 мм. Оставшуюся часть прутка, после отбора проб для изучения микроструктуры в продольном и поперечном сечениях, делили на несколько фрагментов, один из которых шел на изготовление образцов для проведения механических испытаний на растяжение, а другие использовались для последующей холодной обработки волочением. На рисунках 4.17 и 4.18 приведены характерные структуры полученных с разными значениями коэффициента вытяжки прутков диаметрами 6 и 8 мм соответственно.

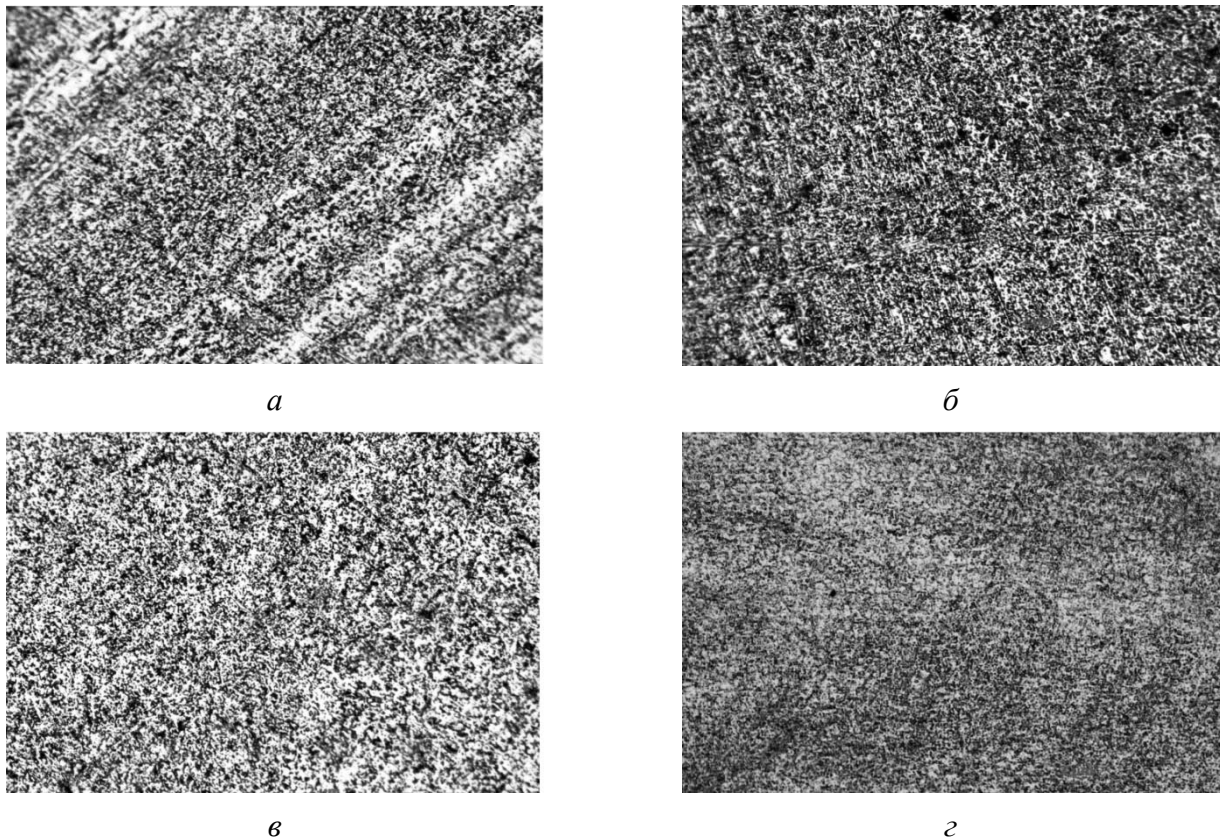


Рисунок 4.17 – Характерные микроструктуры прутка диаметром 6 мм в продольном (а, в) и поперечном (б, г) сечениях, $\times 320$: а, б – после горячей экструзии; в, г – после отжига

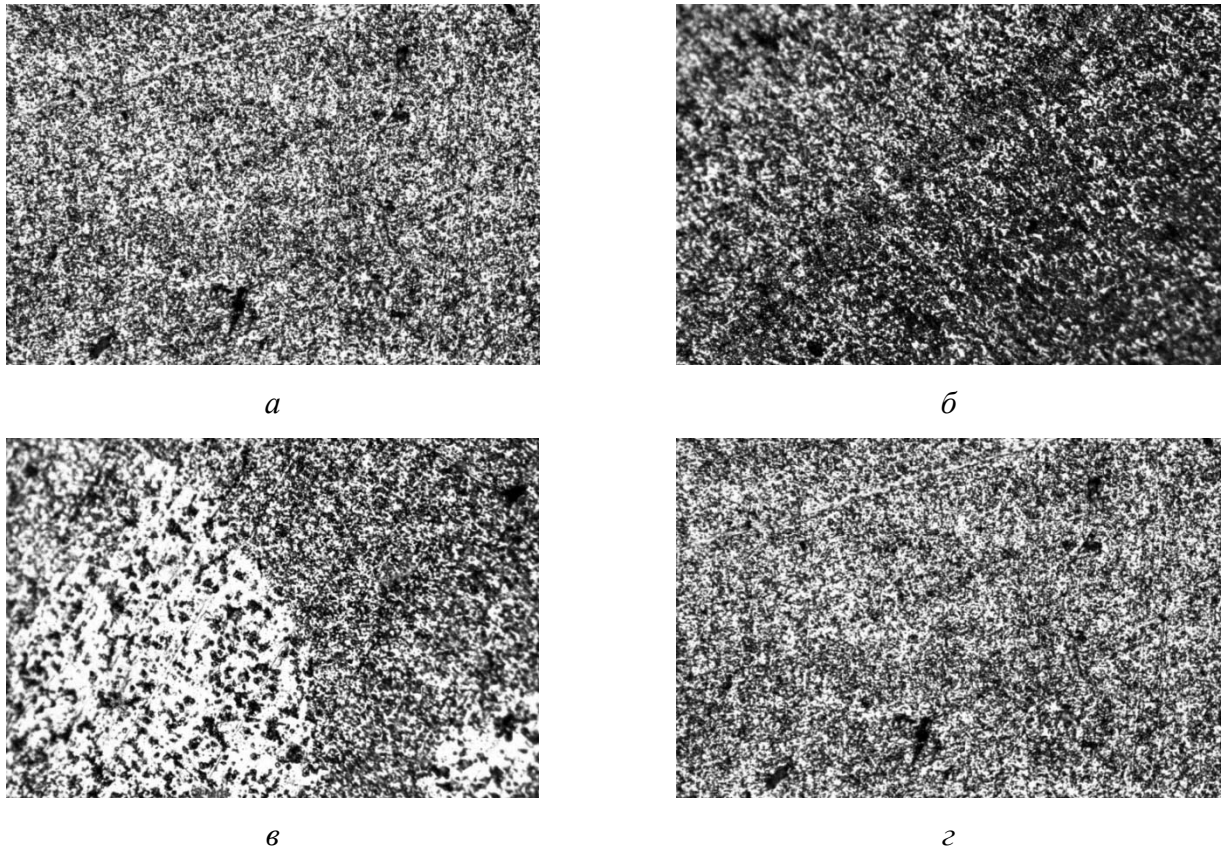


Рисунок 4.18 – Характерные микроструктуры прутка диаметром 8 мм в продольном (*а, в*) и поперечном (*б, г*) сечениях, $\times 320$: *а, б* – после горячей экструзии; *в, г* – после отжига

Структура прутков в продольном сечении строчечная, т. е. светлые, вытянутые в направлении истечения из матрицы, участки алюминиевой фазы перемежаются с более темными областями, насыщенными кремнием. При этом концентрация, размер частиц кремния и порядок их распределения на фоне алюминиевой фазы носят несколько неоднородный характер. В прутке диаметром 6 мм строчечность проявляется чуть резче, чем в прутке диаметром 8 мм, что можно объяснить большей степенью деформации при получении прутка диаметром 6 мм.

Чтобы оценить, какое влияние на структуру и свойства пресс-изделий после горячей экструзии оказывает термообработка, часть образцов, отобранных от полученных экструзией прутков образцов, отжигали при $\theta = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч. После этого проводили сопоставление структур до и после проведения отжига, сравнивая соответствующие данные металлографических исследований, которые также представлены (рисунки 4.17 и 4.18).

Анализ показал, что особых изменений в структуре после отжига не наблюдается. Проведение отжига только в некоторой степени уменьшает строчечность структуры и способствует тому, что кремний распределяется более равномерно в прутках диаметром 6 мм. Размер частиц кремния в α -твердом растворе алюминия в отожженных и неотожженных прутках практически не отличается, за исключением отдельных участков, где имеет место некоторая коагуляция частиц кремния. Исходя из всего вышеизложенного, можно сделать вывод, что проводить отжиг после горячей экструзии в нашем случае не имеет смысла, так как к принципиальным изменениям в структуре он не приводит.

Другую часть полученных горячей экструзией прутков подвергали холодной обработке волочением с единичным обжатием $15\div 20\%$ до того момента, пока не наступала повышенная обрывность проволоки в ходе волочения. При составлении маршрута волочения учитывалось, что кремний не образует с алюминием химических соединений и присутствует в сплавах алюминия в элементарном виде. Имея переменную растворимость, кремний, в тоже время, не влияет на способность алюминия к упрочнению пластической деформацией, что связано с неблагоприятным характером распада твердого раствора кремния в алюминии. Присутствуя в алюминии, кремний только несколько упрочняет его, незначительно снижая при этом пластические свойства.

Характер изменения механических свойств прутков диаметрами 6 и 8 мм (рисунок 4.13) при последующем волочении принципиальных отличий не имеет – с увеличением степени деформации прочностные характеристики материала повышаются, а пластические, наоборот, понижаются. В интервале относительных обжатий до 80% прочность проволоки на конечных размерах может достигать значений $\sigma_b = 280\div 300$ МПа, при этом пластичность заметно снижается до значений $\delta = 2\div 4\%$.

С точки зрения получения прутков или проволоки для последующего модифицирования уровень их механических характеристик принципиального значения не имеет. Важнее обеспечить требуемое структурное состояние материала, достигаемое как раз холодной обработкой. При этом диаметр

используемых прутка или проволоки не должен быть сравнительно маленьким, поскольку в противном случае могут возникнуть технические сложности по введению их в расплав с целью достижения модифицирующего эффекта. В этой связи было решено проследить характер изменения структуры не первых переходах холодного волочения, а для оценки модифицирующей способности материала использовать проволоку диаметром порядка 4 мм.

Изучение структуры производилось на проволоке диаметрами 6,6 и 5,0 мм, каждая из которых была протянута из соответствующих прессованных прутков определенного диаметра с суммарным относительным обжатием 30 %. Анализ приведенных на рисунке 4.19 микроструктур показывает, что по мере уменьшения диаметра прутка происходит, хоть и не совсем равномерное по длине, но достаточно заметное, измельчение кремния.

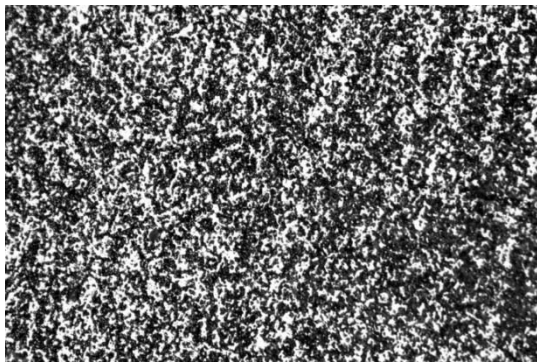
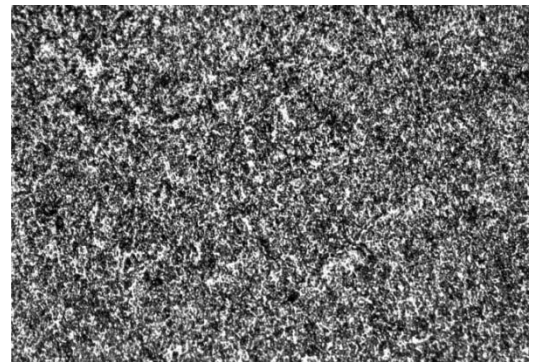
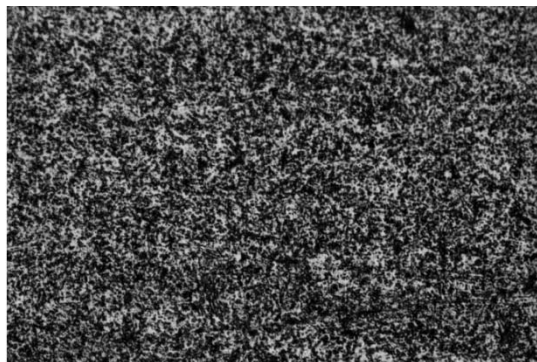
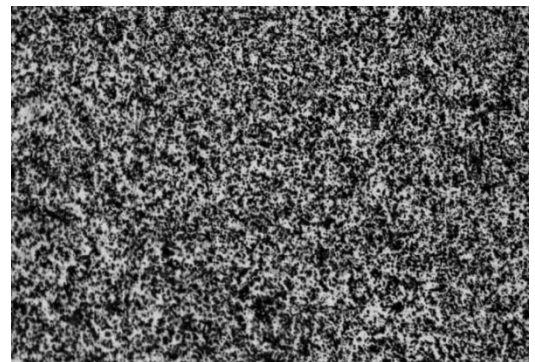
*a**б**в**г*

Рисунок 4.19 – Характерные микроструктуры проволоки разных диаметров в продольном (*a, в*) и поперечном (*б, г*) сечениях, $\times 320$: *a, б* – диаметр 5 мм (тянутая из прутка диаметром 6 мм); *в, г* – диаметр 6,6 мм (тянутая из прутка диаметром 8 мм)

Оценка модифицирующей способности экспериментально полученной проволоки производилась в полупромышленных условиях при осуществлении реального технологического процесса литья под низким давлением заготовок алюминиевых автомобильных дисков колес на предприятии «КиК» (г. Красноярск).

Целью данного этапа исследования было изучение возможности модифицирования расплава АК12 проволокой, полученной из стружковых отходов этого же сплава.

Для приготовления сплава использовались следующие шихтовые материалы:

- алюминий первичный, марки не ниже А7 (ГОСТ 11069);
- кремний кристаллический, марки не ниже КР 00 (ГОСТ 2169);
- магний Mg 90;
- лигатура Ti80F;
- отходы собственного производства (бракованные колеса, переплав АК12, стружка).

В ходе работы в качестве основного оборудования использовали:

- печь индукционную тигельную ИАТ – 2.5;
- ковш разливочный (1 т);
- роторную установку дегазации;
- печь литейной установки.

Жидкий алюминий заливали в индукционную печь. Добавляли в расплав кремний и титан, после чего проводили рафинирование расплава флюсом. Затем отбирали пробу на экспресс-анализ, а получив требуемый результат, добавляли магний. После этого снимали шлак, подогревали расплав и сливали его в разливочный ковш в количестве 540 кг. Далее выполняли рафинирование расплава аргоном на роторной установке. После окончания обработки расплава и достижения им температуры $710\div 720$ °С, сливали готовый металл в печь литейной машины, после чего снимали шлак и отбирали соответствующие пробы.

После выхода пресс-формы на требуемый температурный режим изготавливали 5 отливок (без модифицирования расплава) со следующими параметрами процесса: $\theta_{\text{ме}} = 715 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_{\text{цикла}} = 170 \pm 10 \text{ сек}$, $P = 200\text{--}650 \text{ мбар}$. Потом вводили прутковую лигатуру в количестве 3 % и производили еще 5 отливок.

Из полученных отливок вырезали образцы для определения химического состава и испытания механических свойств, а также проведения анализа микроструктуры.

Ниже приведены химический состав (таблица 4.5) и механические свойства (таблица 4.6) отлитых колес. Кроме того, здесь же указаны значения механических характеристик, соответствующие требованиям ГОСТ 50511, а также диапазон данных характеристик, получаемый при литье колес по технологии, применяемой в настоящее время на ООО «КиК» (сплав, модифицированный лигатурами AlTiB и AlSr).

Таблица 4.5 – Химический состав опытных колес

Характеристика отливки	Химический состав, в вес %											
	Si	Fe	Ca	Mg	Ni	Zn	Ti	B	Pb	Sn	Sr	Al
До введения лигатуры	11,40	0,173	0,001	0,055	0,001	0,014	0,113	0,001	0,0021	0,0017	0,0032	88,23
Модифицированная проволокой диаметром 4,2 мм	11,36	0,170	0,001	0,054	0,001	0,014	0,115	0,001	0,0020	0,0018	0,0032	88,27

Анализ полученных результатов показывает, что колеса, отлитые без модификатора, имеют достаточно низкий уровень механических свойств, не соответствующий требованиям ГОСТ 50511.

Модифицирование расплава лигатурой в виде проволоки диаметром 4,2 мм, произведенной из стружковых отходов, в количестве 3% обеспечило прирост прочностных свойств до значений, удовлетворяющих указанным требованиям.

Таблица 4.6 – Механические свойства опытных колес

Характеристика отливки	Номер отливки	Механические свойства	
		Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %
До введения лигатуры	1	168	4,6
	2	155	4,4
	3	166	3,0
	4	166	4,9
	5	160	4,1
Модифицированная проволокой диаметром 4,2 мм	1	185	11,0
	2	199	10,2
	3	190	9,8
	4	191	8,7
	5	195	10,8
Модифицированная AlTiB и AlSr	-	181÷200	8,8÷12,0
Требования ГОСТ 50511	-	Не менее 160 МПа	Не менее 5 %

При исследованиях микроструктуры было установлено, что в отливках, изготовленных без введения прутковой лигатуры, имеет место непромодифицированная эвтектика (рисунок 4.20), а после добавления прутков наблюдаются тонкодисперсные включения кремния в эвтектике без присутствия на границах зерен – колоний грубых частиц кремния и игольчатых железосодержащих фаз (рисунок 4.20, б).

На рисунке 4.21 представлена микроструктура колеса из сплава АК12, модифицированного лигатурами AlTiB и AlSr. Сравнения их со структурой, получаемой с применением экспериментальной проволоки (рисунок 4.20, б), можно сделать вывод, что они имеют достаточно схожий характер при введении одной лигатуры AlSr. При совместном введении AlSr + AlTiB в колесах наблюдается перемодифицированная структура

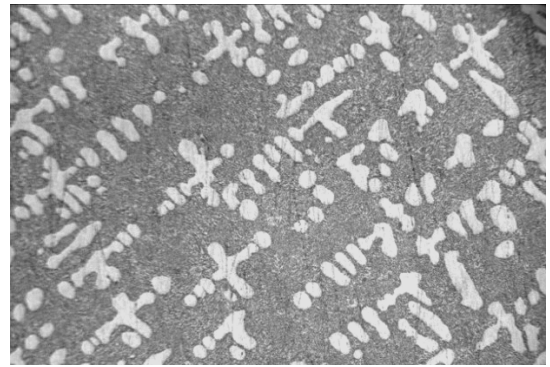
*a**б*

Рисунок 4.20 – Микроструктура колес из сплава АК12 до (*a*) и после (*б*) введения проволоочной лигатуры диаметром 4,2 мм из стружковых отходов, $\times 200$

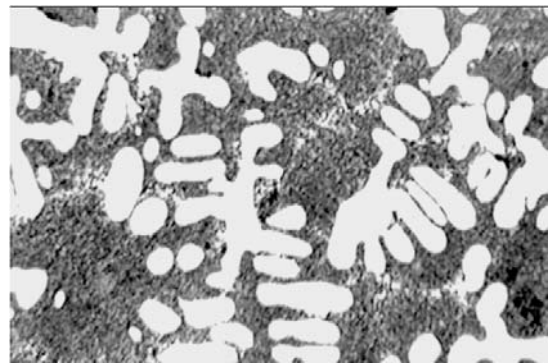
*a**б*

Рисунок 4.21 – Микроструктура колеса из сплава АК12 модифицированного лигатурами AlSr (*a*) и AlSr + AlTiB (*б*), $\times 200$

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что использование приемов, характерных для процессов порошковой металлургии и традиционной обработки давлением, позволяет, исключив переплав, получать прутки и проволоку непосредственно из стружки сплава АК12, относящегося, как известно, преимущественно к группе литейных сплавов. Введением проволоки, произведенной из стружковых отходов, в расплав АК12 удастся добиться в отливках формирования структуры и достижения механических свойств, близких по данным показателям к отливкам, модифицированным по действующей технологической схеме с использованием лигатур AlTiB и AlSr. Исходя из этого, можно прийти к заключению, что потенциально полученную по предлагаемой

технологической схеме проволоку можно применять в качестве модификатора в условиях реального промышленного производства.

Второй вариант использования полученной проволоки из стружки сплава АК12 предполагал применение ее в качестве сварочной проволоки. Требования к такой проволоке сформулированы в технических условиях ТУ 1-808-274–2003 «Проволока тянутая из сплава СвАК12», согласно которым ее диаметр не должен превышать 2,0 мм, при этом ее механические свойства не регламентируются.

Основными этапами (переделами) данной технологии являлись следующие:

- формирование заготовки заданных формы и размеров поперечного сечения;
- нагрев и деформация заготовки методом совмещенной прокатки-прессования для получения прутка диаметром 7 мм;
- волочение проволоки до заданного диаметра с применением при необходимости промежуточного отжига.

Для изготовления прутков использовали лабораторную установку СПП-200 (рисунок 3.15). Заготовки (не менее трех) непосредственно перед задачей в валки нагревали до температуры (500 ± 20) °С в печи, входящей в состав установки СПП. Параллельно проводили подогрев валков вместе с установленной матрицей до температуры $80 \div 100$ °С. Подачу заготовок в закрытый калибр, образованный валками, осуществляли последовательно одну за одной, стремясь с целью сварки к сокращению до минимума пауз между их поступлением в очаг деформации. Минимальный зазор между валками составлял 7 мм, а диаметр рабочего отверстия матрицы, используемой для получения прутков, был равен 7 мм. Процесс совмещенной прокатки-прессования при таком уровне деформации (50 % обжатия при прокатке и коэффициенте вытяжки порядка $\mu = 7$ при прессовании) протекал достаточно устойчиво. При этом диаметр полученных прутков лежал в поле заданных инструментом допусков $\pm 0,05$ мм.

Холодное волочение отпрессованных прутков диаметром 7 мм для получения проволоки требуемого диаметра 2 мм осуществлялось на цепном

волочильном стане усилием 50 кН со средним обжатием $\varepsilon_{cp} = 10 \div 15$ %. Внешний вид полученной проволоки представлен на рисунке 4.22.



Рисунок 4.22 – Проволока диаметром 2,0 мм, изготовленная из стружки сплава АК12

Для отслеживания изменения уровня механических характеристик металла в ходе волочения осуществляли отбор соответствующих образцов проволоки, которые испытывали методом растяжения. Сообщаемая проволоке к этому моменту суммарная величина деформации оценивалась показателем ε_{Σ} , рассчитываемым по формуле (4.11). Полученные механические свойства проволоки представлены в таблице 4.7. Для сравнения в таблице 4.7 приведены механические свойства аналогичной проволоки из того же сплава, только полученной СПП из заготовки, отлитой с использованием электромагнитного кристаллизатора [89].

Анализ механических свойств, полученных из разных заготовок прутков показал, что, несмотря на одинаковые температурно-скоростные условия совмещенной прокатки-прессования, пластические и прочностные характеристики металла имеют существенные различия. Значения относительного удлинения прутков, полученных из некомпактной заготовки ($\delta = 5 \div 7$ %), оказались в два раза меньше значений удлинения для изготовленных из компактной заготовки. В связи с этим в технологический процесс получения проволоки из некомпактной заготовки для восстановления пластических свойств

пришлось вводить промежуточный отжиг при температуре $\theta_{\text{отж}} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч, который был проведен на диаметре 6 мм.

Таблица 4.7 – Результаты сравнительных испытаний механических свойств полуфабрикатов из сплава АК12, полученных по различным технологиям

Вид полуфабриката	Способ 1		Способ 2	
	Технология	Механические свойства	Технология	Механические свойства
Исходная заготовка	Литье в ЭМК заготовки диаметром 16,7 мм	$\sigma_{\text{в}} = 285 \div 295 \text{ МПа}$ $\delta = 14,0 \div 16,0 \%$ $\psi = 18,0 \div 20,0 \%$	Горячее брикетирование заготовки размерами $h \times b \times l = 13 \times 15 \times 200 \text{ мм}$	$\rho = 85 \div 87 \%$
Пруток диаметром 7 мм	Совмещенная прокатка-прессование ($\mu = 7$)	$\sigma_{\text{в}} = 245 \div 255 \text{ МПа}$ $\delta = 12,0 \div 14,0 \%$	Совмещенная прокатка-прессование ($\mu = 7$)	$\sigma_{\text{в}} = 220 \div 230 \text{ МПа}$ $\delta = 5,0 \div 7,0 \%$ $\psi = 8,0 \div 10,0 \%$
Проволока диаметром 4 мм	Волочение без отжига ($\epsilon_{\Sigma} = 67 \%$)	$\sigma_{\text{в}} = 350 \div 360 \text{ МПа}$ $\delta = 9,5 \div 11,5 \%$	Волочение с отжигом на диаметр 6 мм ($\epsilon_{\Sigma} = 56 \%$)	$\sigma_{\text{в}} = 180 \div 185 \text{ МПа}$ $\psi = 3,0 \div 4,0 \%$
Проволока диаметром 3 мм	Волочение без отжига ($\epsilon_{\Sigma} = 82 \%$)	$\sigma_{\text{в}} = 420 \div 430 \text{ МПа}$ $\delta = 3,5 \div 5,0 \%$	Волочение с отжигом на диаметр 6 мм ($\epsilon_{\Sigma} = 75 \%$)	$\sigma_{\text{в}} = 190 \div 195 \text{ МПа}$ $\psi = 2,5 \div 3,0 \%$
Проволока диаметром 2 мм	Волочение без отжига ($\epsilon_{\Sigma} = 92 \%$)	$\sigma_{\text{в}} = 455 \div 470 \text{ МПа}$ $\delta = 1,0 \div 2,0 \%$	Волочение с отжигом на диаметр 6 мм ($\epsilon_{\Sigma} = 89 \%$)	$\sigma_{\text{в}} = 200 \div 210 \text{ МПа}$ $\psi = 1,5 \div 2,0 \%$

Из представленных в таблице 4.7 данных также следует, что, независимо от способа формирования заготовки для обработки методом СПП, горячедеформированные прутки имеют повышенные прочностные и пластические свойства по сравнению с теми, что регламентируются стандартом на литое состояние. Объяснить это явление можно сохранением уровня нагартовки материала, полученной в процессе СПП, и заторможенностью протекания процессов рекристаллизации в алюминиевых сплавах, в том числе содержащих кремний. При этом прутки, изготовленные из заготовки, отлитой в

ЭМК, обладает повышенным (практически в 2 раза) ресурсом пластичности, что делает нецелесообразным проведение для него промежуточного отжига при последующем холодном волочении. В ходе волочения металл проволоки заметно упрочняется, одновременно теряя в пластичности, что относительно потребительских характеристик, предъявляемых к сварочной проволоке, не совсем желательно. Поэтому по мере приближения к конечным размерам или после последнего перехода проволоку рекомендуется подвергать отжигу.

При реализации варианта, заключающегося в применении в качестве заготовок стружковых брикетов с относительной плотностью $\rho = 85 \div 87 \%$, наличие промежуточного отжига (в рассматриваемом примере технологии на диаметре 6 мм) является неотъемлемым условием дальнейшего устойчивого проведения процесса холодного волочения проволоки с целью исключения ее обрывов. При этом после отжига, несмотря на существенное снижение прочности до значений $\sigma_b = 100 \div 110$ МПа и незначительное повышение пластичности металла, ее ресурса, наряду со снижающейся интенсивностью упрочнения, вполне хватает для получения проволоки заданного диаметра. Данный вариант технологии отличается еще и тем, что себестоимость такой проволоки оказалась ниже по сравнению с себестоимостью проволоки, произведенной из литой заготовки на ЭМК, так как в качестве исходного сырья использовались отходы машиностроительного производства в виде стружки [89].

Образцы стружковой проволоки из сплава АК12 были переданы на ОАО «Информационные спутниковые системы» (г. Железногорск) для проведения опытной пайки волноводных трактов из алюминиевых сплавов (Приложения А, Б). В результате опробования было установлено, что качество пайки взятых для испытаний узлов соответствует нормативным требованиям, а разработанная технология получения проволоки может быть рекомендована для промышленного применения [40].

4.6 Выводы по главе

1. С помощью моделирования процесса волочения пористого прутка из сплава АД31 в программном комплексе ABAQUS получены данные по распределению в объеме очага деформации относительной плотности, степени деформации, нормальных и касательных напряжений в зависимости от условий контактного трения, анализируя которые можно определить такой путь развития деформации, при котором влияние первоначально заложенных в структуру несплошностей окажется минимальным.

2. С привлечением метода полного факторного эксперимента изучено влияние на механические свойства тянутой проволоки из стружки сплава АД31 накопленной степени деформации и скорости волочения. Установив, что скорость волочения в рассматриваемых пределах является незначимым фактором, полученные данные представлены в виде соответствующих уравнений регрессии, отражающих изменение временного сопротивления разрыву и относительного удлинения в зависимости от относительного обжатия. По аналогии были определены уравнения для оценки временного сопротивления разрыву и относительного удлинения при волочении проволоки, полученной из стружки сплава АК12:

3. Проведено практическое опробование и дан сравнительный анализ потенциально альтернативных схем получения промежуточного полуфабриката в виде прутка из стружки сплава АД31. Эти схемы подразумевают различные варианты комбинирования процессов брикетирования и горячего прессования, в том числе и с использованием метода совмещенной прокатки-прессования.

4. С использованием способа дискретного прессования и метода совмещенной прокатки-прессования осуществлено экспериментальное опробование процессов изготовления прутков и проволоки из стружковых отходов малоприспособного для получения изделий обработкой давлением сплава АК12. В ходе проведения механических испытаний и металлографических исследований полученных прутков и проволоки изучено влияние сообщаемой

материалу степени деформации и отмечена роль проводимого на различных этапах обработки отжига.

5. Полученная из стружки сплава АК12 проволока прошла практическое опробование в качестве модификатора при литье под низким давлением дисков автомобильных колес на предприятии ООО «КиК» (г. Красноярск) и в качестве сварочной проволоки для пайки конструкций специального назначения из алюминиевых сплавов на ОАО «Информационные спутниковые системы» (г. Железногорск).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований сделаны выводы и получены следующие результаты.

1. Разработана общая технологическая схема термомодеформационной обработки сыпучих стружковых отходов алюминиевых сплавов, включающая стадии подготовки стружки к компактированию, ее брикетирования, прессования и волочения. Данная схема опробована применительно к получению прутково-проволочной продукции из сортных стружковых отходов сплавов АД31 и АК12, причем процесс прессования брикетов рассмотрен в двух вариантах – дискретном (циклическом) и непрерывном.

2. Проведено с использованием стандартных методик изучение структуры и свойств полученных опытных образцов длинномерных полуфабрикатов из исследуемых сплавов, на основании которых отмечены особенности структурообразования и закономерности формирования свойств изготовленных из стружки изделий.

3. С применением компьютерного моделирования детально проанализирован процесс совмещенной прокатки-прессования пористой заготовки из скомпактированной стружки сплава АД31, в результате которого установлено распределение температуры, степени деформации и относительной плотности в объеме очага деформации, а также определены момент и сила прокатки.

4. Проведено моделирование процесса волочения прутка из того же сплава, обладающего остаточной пористостью, по результатам которого показано распределение степени деформации, средних нормальных и касательных напряжений в зависимости от условий контактного трения.

5. С использованием методики полного факторного эксперимента получены уравнения для определения временного сопротивления разрыву и относительного удлинения при холодном волочении проволоки, полученной из стружки сплавов АД31 и АК12.

6. Проведенные на предприятии ООО «КиК» экспериментальные исследования показали, что введение в расплав прутков и проволоки, полученных из стружковых отходов сплава АК12, приводит к измельчению включений кремния в эвтектике отливок из того же сплава. При этом максимальный модифицирующий эффект достигается при введении ее в расплав в количестве не менее 3 %.

7. По результатам опытной пайки волноводных трактов из алюминиевых сплавов на ОАО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева» дано заключение о пригодности для пайки проволоки диаметром 2 мм из сплава АК12, изготовленной из сыпучей стружки по предлагаемым схемам совмещенной обработки.

8. Возможными областями практического применения прутково-проволочной продукции из стружковых отходов сплава АД31 является использование ее либо как альтернативы изделиям неответственного назначения, получаемых из литой заготовки, либо как основы для введения в соответствующие расплавы специальных порошковых добавок модифицирующего назначения.

9. Результаты работы внедрены в учебный процесс СФУ и используются при обучении бакалавров и магистров по направлению «Металлургия» и аспирантов научной специальности 05.16.05 Обработка металлов давлением.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Wan, B. Review of solid state recycling of aluminum chips / B.Wan, W. Chen, T. Lu, F. Liu // Resources, Conservation and Recycling. – 2017. – Vol. 125. – P. 37–47.
2. Shamsudin, S. Evolutionary in Solid State Recycling Techniques of Aluminium: A review / S. Shamsudin, M. Lajis, Z. W. .Zhong // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 40. – P. 256–261.
3. Recycling of aluminium: веб-сайт компании Hydro [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.hydro.com/en/About-aluminium>.
4. ГОСТ 1639–93 Лом и отходы цветных металлов и сплавов. Общие технические условия. Взамен ГОСТ 1639–78; введ. 2000-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 190 с.
5. Фомин, Б. А. Metallургия вторичного алюминия / Б. А. Фомин. – М. : Экомет, 2004. – 240 с.
6. Ab Rahim, S. N. A Review on Recycling Aluminum Chips by Hot Extrusion Process / S. N. Ab Rahim, M. A. Lajis, S. Ariffin // 12th Global Conf. on Sustainable Manufacturing. Procedia CIRP. – 2015. – Vol. 26. – P. 761–766.
7. Гогин, В. Б. Развитие технологии и оборудования литейного производства алюминия. Технология легких сплавов / В. Б. Гогин, Д. А. Шадаев // ВИЛС: Всерос. ин-т легких сплавов. – 2007. – № 4. – С. 83–85.
8. Кондратьева, И. К. Вторичные материальные ресурсы цветной металлургии: справочник / И. К. Кондратьева, Ю. П. Купряков, Т. И. Патлаева [и др.]. – М. : Экономика, 1984. – 151 с.
9. Алексеенко, А. В. Сбор и переработка металлической стружки / А. В. Алексеенко. – М. : Машиностроение, 1980. – 119 с.
10. Шкляр, М. С. Печи вторичной цветной металлургии / М. С. Шкляр. – М. : Металлургия, 1987. – 216 с.
11. Mounghomo, J. B. M. Aluminium machining chips formation, treatment & recycling / J. B. M. Mounghomo, D. N. Kouya, V. Songmene // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 710. – P. 71–76.

12. Андронов, В. П. Плавно-литейное производство драгоценных металлов и сплавов / В. П. Андронов. – М. : Metallurgy, 1974. – 320 с.
13. Корнилов, В. Н. Непрерывное прессование со сваркой алюминиевых сплавов / В. Н. Корнилов. – Красноярск : Изд-во пед. ин-та, 1990. – 211 с.
14. Каракозов, Э. С. Сварка металлов давлением / Э. С. Каракозов. – М. : Машиностроение, 1986. – 264 с.
15. Баузер, М. Прессование : справочное руководство / М. Баузер, Г. Зауер, К. Зигерт. – М. : АЛЮСИЛ МВнТ, 2009. – 922 с.
16. Строганов, Г. Б. Сплавы алюминия с кремнием / Г. Б. Строганов, В. А. Ротенберг, Г. Б. Гершман. – М. : Metallurgy, 1977. – 271 с.
17. Полухин, П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : Metallurgy, 1983. – 488 с.
18. Золоторевский, В. С. Metallovedenie litynykh aluminievyykh spлавov. / В. С. Золоторевский, Н. А. Белов. – М. : МИСиС, 2005. – 367 с.
19. Федорченко, И. М. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения : справочник / И. М. Федорченко, И. Н. Францевич, И. Д. Радомысльский [и др.]. – К. : Наук. думка, 1985. – 624 с.
20. Северденко, В. П. Обработка давлением гранул алюминиевых сплавов / В. П. Северденко, Н. В. Шепельский, В. З. Жилкин. – М. : Metallurgy, 1980. – 216 с.
21. Anilchandra, A. R. Microstructure and tensile properties of consolidated magnesium chips / A. R. Anilchandra, M. K. Surappa // Materials Science and Engineering: A. – 2003. – V. 560. P. 759–766.
22. Ryoichi, C. Solid-state recycling of aluminium alloy swarf into c-channel by hot extrusion / C. Ryoichi, Y. Morihiro // Journal of Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 17. – P. 1–8.

23. Капорович, В. В. Прессование профильного материала из стружки алюминиевых сплавов с наложением сдвиговых деформаций : дис. ... канд. тех. наук : 05.03.05 / Капорович Владимир Владимирович. Р. н/Д., 1985. – 230 с.

24. Костин, Н. А. Динамика процесса экструзии при брикетировании стружки алюминиевых сплавов : дис. ... канд. тех. наук : 01.02.06 / Костин Николай Анатольевич. Курск, 1998. – 122 с.

25. Repelnjak, T. Recycling of AlMgSi1 aluminium chips by cold compression / T. Repelnjak, K. Kuzman, I. Kasmarcik, M. Plancak // Metallurgija. – 2012. – Vol. 51, – Iss. 4, P. 509.

26. Guley, V. Direct recycling of 1050 aluminum alloy scrap material mixed with 6060 aluminum alloy chips by hot extrusion / V. Guley, N. Ben Khalifa, A. E. Tekkaya // Int J Matet Form. – 2010. – Vol. 3. – Suppl. 1. – P. 853–856.

27. Шнейберг, А. М. Экспериментальное исследование процесса компактирования хрупкой и пластичной стружки по схеме сжатие плюс вращение / А. М. Шнейберг, О. С. Кошелев, Ф. П. Михаленко // Кузнечно-штамповочное производство. – 2014. – № 9. – С. 8–12.

28. А. с. 1247160 СССР, МКИ В 22 F 3/02, 3/20, В 21 J 13/02, 5/00. Способ изготовления прутков и профилей из металлической стружки и устройство для его осуществления [Текс] / О. А. Ганаго, Н. А. Шестаков, Ю. И. Попов [и др.] (СССР). – № 3883521/22-02 ; заявл. 12.02.85 ; опубл. 30.07.86, Бюл. № 28 – 4 с. : ил.

29. А. с. 1026963 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для экструзии металлических гранул [Текс] / Л. Н. Соколов, В. В. Капорович, Л. П. Селезнев [и др.] (СССР). – № 3397248/22-02 ; заявл. 17.02.82 ; опубл. 07.07.83, Бюл. № 25 – 2 с. : ил.

30. А. с. 1637957 СССР, МКИ В 22 F 3/02, В 30 В 12/00. Устройство для прессования изделий из измельченного металла [Текс] / Ю. А. Агапов. Ш. Ш. Хазин, Г. Н. Цыкин [и др.] (СССР). – № 4632830/02 ; заявл. 05.01.89 ; опубл. 30.03.91, Бюл. № 12 – 3 с. : ил.

31. Matthias, H. Recycling of aluminum chips by hot extrusion with subsequent cold extrusion / H. Matthias, T. A. Erman // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 81. – P. 652–657.

32. Мезин, И. Ю. Формирование металлоизделий из структурно-неоднородных материалов / И. Ю. Мезин. – Магнитогорск : Изд-во МГТУ им. Г. И. Носова, 2000. – 155 с.

33. Биронт, В. С. Материаловедение. Формирование структуры нового класса стружковых материалов : учебное пособие для студентов обучающихся по направлению «Металлургия» / В. С. Биронт, В. И. Аникина, Н. Н. Загиров. – Красноярск : Гос. ун-т цв. металлов и золота, 2005. – 80 с.

34. Загиров, Н. Н. Использование методов термомеханической обработки для получения изделий из сортовой сыпучей стружки цветных металлов и сплавов / Н. Н. Загиров // *Цветные металлы – 2010* : сб. докл. II Международ. конгресса. – Красноярск : Версо. – 2010. – С. 677–681.

35. Загиров, Н. Н. Технологические основы получения материалов и изделий из сыпучих стружковых отходов меди и ее сплавов методами обработки давлением : монография / Н. Н. Загиров, Ю. Н. Логинов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – 171 с.

36. Загиров, Н. Н. Технологические основы получения материалов и изделий из сыпучих отходов сплавов алюминия : монография / Н. Н. Загиров, Ю. Н. Логинов, С. Б. Сидельников, Е. В. Иванов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019. – 204 с.

37. Загиров, Н. Н. Изготовление прутков и проволоки из стружки силумина с использованием прямой горячей экструзии цилиндрических брикетов / Н. Н. Загиров, Ю. Н. Логинов, Е. В. Иванов, Р. Р. Ризаханов // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2019. – № 4. – С. 168–174.

38. Загиров, Н. Н. Влияние способа формования заготовок-брикетов на свойства прутков из стружки силумина / Н. Н. Загиров, С. Б. Сидельников, Е. В. Иванов, Е. В. Феськова // *Известия ТГУ. Технические науки*. – 2019. – Вып. 5. – С. 139–145.

39. Логинов, Ю. Н. Сопротивление деформации пористого силумина при повышенных температурах / Ю. Н. Логинов, Н. Н. Загиров, Е. В. Иванов, Р. Р. Ризаханов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2018. – № 8. – С. 354–357.

40. Загиров, Н. Н. Разработка технологии изготовления сварочной проволоки СВАК12 из стружковой заготовки / Н. Н. Загиров, И. Л. Константинов, Е. В. Иванов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2012. – № 2. – С. 36–41.

41. Zagirov, N. N. The development of technology for making SvAK12 welding wire from shaving billet / N. N. Zagirov, I. L. Konstantinov, E. V. Ivanov // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2012. – Vol. 53. – P. 145–149.

42. Загиров, Н. Н. Технологическая схема получения лигатурного прутка из стружки силумина, исключая ее переплав / Н. Н. Загиров, В. И. Аникина, Г. П. Усынина, А. С. Юриков, Е. В. Иванов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2011. – Вып. 1. – С. 34–38.

43. Щерба, В. Н. Технология прессования металлов / В. Н. Щерба, Л. Х. Райтбарг. – М. : Металлургия, 1995. – 335 с.

44. Перлин, И. Л. Теория прессования металлов / И. Л. Перлин, Л. Х. Райтбарг – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1975. – 447 с.

45. Yueli, P. Analysis of stress and temperature in the CONFORM forming process – Foundation theory / P. Yuelin, H. Jian, M. Bin // J. of Central South University of Technology. November. – 1996. – Vol. 3. – Iss. 2. – P. 153–158.

46. Буркин, С. П. Непрерывное прессование заготовок через разъемный контейнер / С. П. Буркин, Ю. Н. Логинов // Изв. высш. учеб заведений. Черная металлургия. – 1997. – № 10. – С. 40–45.

47. Пат. 2038913 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/12. Способ совмещенной непрерывной разливки и деформации металлов и устройство для его осуществления [текст] / Буркин С. П., Логинов Ю. Н., Коршунов Е. А. ; заявитель и патентообладатель Буркин С. П., Логинов Ю. Н., Коршунов Е. А. – № 5062667/02 ; заявл. 09.22.92 ; опубл. 09.07.95. – 2 с. : ил.

48. Пат. 2016682 Российская Федерация, МПК В 21 С 23/20. Способ непрерывного прессования заготовок и устройство для его осуществления [текст] / Буркин С. П., Логинов Ю. Н., Коршунов Е. А.; заявитель и патентообладатель Буркин С. П., Логинов Ю. Н., Коршунов Е. А. – № 5065937/27 ; заявл. 13.10.92 ; опубл. 30.07.94. – 2 с. : ил.

49. Горохов, Ю. В. Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов: монография / Ю. В. Горохов, В. Г. Шеркунов, Н. Н. Довженко [и др.]. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – 224 с.

50. Сидельников, С. Б. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов : монография / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, Н. Н. Загиров. – М. : МАКС Пресс, 2005. – 343 с.

51. Сергеев, В. М. Оптимизация размеров исходной заготовки для непрерывного прессования / В. М. Сергеев, Ю. Н. Логинов, Ю. В. Горохов, Н. Н. Загиров // Металлы. – 1993. – № 1. – С. 98–102.

52. Логинов, Ю. Н. Энергосбережение в процессах прессования / Ю. Н. Логинов, С. П. Буркин // Цветные металлы. – 2002. – № 10. – С. 81–87.

53. Zagirov, N. N. Alternative technology for manufacturing rod-wire products from AK12 silumin / N. N. Zagirov, Yu. N. Loginov, S. B. Sidelnikov, E. V. Ivanov // Metallurgist. – 2018. – Vol. 62. – P. 587–596.

54. Загиров, Н. Н. Вариант технологии получения прутково-проволочной продукции из силумина АК12 / Н. Н. Загиров, Ю. Н. Логинов, С. Б. Сидельников, Е. В. Иванов // Металлург. – 2018. – № 6. – С. 89–95.

55. Логинов, Ю. Н. Возникновение зон неконтактной деформации в процессе прокатки-прессования пористого прутка / Ю. Н. Логинов, А. А. Ершов, Н. Н. Загиров, Е. В. Иванов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2017. – № 3. – С. 38–41.

56. Ershov, A. A. Simulation of the consolidation of a porous material in a combined rolling-extrusion process / A. A. Ershov, Yu. N. Loginov, N. N. Zagirov, E. V. Ivanov // Metallurgist. – 2016. – Vol. 60 – P. 561–565.

57. Ершов, А. А. Моделирование уплотнения пористого материала в совмещенном процессе прокатки-прессования / А. А. Ершов, Ю. Н. Логинов, Н. Н. Загиров, Е. В. Иванов // *Металлург.* – 2016. – № 6. – С. 14–17.

58. Загиров, Н. Н. Технология изготовления проволоки с волокнистой структурой из стружки сплава системы алюминий–магний–кремний / Н. Н. Загиров, А. А. Ковалева, Е. В. Иванов // *Вестник СибГАУ имени академика М. Ф. Решетнева.* – 2010. – Вып. 2. – С. 68–72.

59. Загиров, Н. Н. Исследование структуры и свойств деформированных полуфабрикатов, полученных из сыпучей стружки сплава системы алюминий–магний–кремний / Н. Н. Загиров, С. Б. Сидельников, Е. В. Иванов, В. И. Аникина // *Вестник МГТУ им. Г. И. Носова.* – 2010. – Вып. 2. – С. 50–56.

60. Логинов, Ю. Н. Влияние скорости деформации на эффект структурного упрочнения прессованных труб из алюминиевого сплава 6061 / Ю. Н. Логинов, О. Ф. Дегтярева // *Технология легких сплавов.* – 2007. – № 4. – С. 123–127.

61. Каргин, В. Р. Основы технологических процессов ОМД: раздел прессование / В. Р. Каргин, Б. В. Каргин. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 104 с.

62. Логинов, Ю. Н. Влияние стадии распрессовки полого слитка из алюминиевого сплава на процесс последующего прессования / Ю. Н. Логинов, О. Ф. Дегтярева // *Кузнечно-штамповочное пр-во. Обработка материалов давлением.* – 2007. – № 7. – С. 37–42.

63. Loginov, Yu. N. Evolution of defects in the production of capillary copper tubes / Yu. N. Loginov, S. L. Demakov, A. G. Illarionov, M. S. Karabanalov // *J. of Materials Processing Technology.* – 2015. – Vol. 224. – P. 80–88.

64. Логинов, Ю. Н. Формоизменение поры в центральной части прутка на начальной стадии прессования / Ю. Н. Логинов, К. В. Еремеева // *Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия.* – 2009. – № 9. – С. 46–50.

65. Логинов, Ю. Н. Влияние типа пластической деформации на видоизменение одиночной поры / Ю. Н. Логинов, К. В. Еремеева // *Деформация и разрушение материалов.* – 2011. – № 4. – С. 40–44.

66. А. с. 914180 СССР, МКИ В 22 F 3/02, В 30 В 15/02. Пресс-форма для прессования изделий из порошка / Г. П. Злобин, Г. И. Бешенков, В.С. Декопов [и др.]. № 2929425/22–02; заявл. 26.05.80; опубл. 23.03.82; Бюл. № 11. – 3 с. : ил.

67. Загиров, Н. Н. Получение проволоки с волокнистой структурой из стружки сплава АД31 на основе реализации способа совмещенной прокатки-прессования / Н. Н. Загиров, С. Б. Сидельников, Е. В. Иванов, В. М. Беспалов // Обработка сплошных и слоистых материалов : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. проф. М. В. Чукина. – Магнитогорск : Изд-во МГТУ им. Г. И. Носова, – 2012. – Вып. 38. – С. 10–15.

68. Белов, Н. А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов / Н. А. Белов. – М. : ИД МИСиС, 2010. – 509 с.

69. Aktarer, S. M. Effect of two-pass friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of as-cast binary Al–12Si alloy / S. M. Aktarer, D. M. Sekban, O. Saray, T. Kucukomeroglu // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 636. – P. 311–319.

70. El Sebaie, O. The effects of mischmetal, cooling rate and heat treatment on the hardness of A319.1, A356.2 and A413.1 Al–Si casting alloys / O. El Sebaie, A.M. Samuel, F.H. Samuel, H.W. Doty // Materials Science and Engineering: A. – 2008. – Vol. 486. – Iss. 1–2. – P. 241–252.

71. Dolata-Grosz, A. Structure and properties of aluminium cast composites strengthened by dispersion phases / A. Dolata-Grosz, J. Ślężiona, B. Formanek // J. of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 175. – Iss. 1–3. – P. 192–197.

72. Trifonov, V. G. Hot deformation regimes, their influence on structure and mechanical properties of silumin based composite materials and specific features of this influence / V. G. Trifonov, I. V. Kamalova, V. S. Romanova, V. N. Platonov // Materials Science and Engineering: A. – 1997. – Vol 234–236. – P. 242–244.

73. Solovei, V. D. Calculating extrusion textures of the alloy Mn–Al–C / V. D. Solovei, Yu. N. Loginov // Textures and Microstructures. – 1996. – Vol. 28. – P. 121 – 128.

74. Hu, H. E. High temperature deformation behavior and optimal hot processing parameters of Al–Si eutectic alloy / H. E. Hu, Xin-yun Wang, L. Deng // *Materials Science and Engineering: A*. – 2013. – Vol. 576. – P. 45–51.

75. Herba, E. M. Influence of particulate reinforcements on 6061 materials in extrusion modeling / E. M. Herba, H. J. McQueen // *Materials Science and Engineering: A*. – 2004. – Vol. 372. – P. 1–14.

76. Пат. 2429943 Российская Федерация, МПК В 22 F 3/18, В 22 F 5/12, В 21 С 37/04, В 21 В 1/10. Устройство для получения проволоки и профилей из некомпактных материалов [текст] / Сидельников С. Б., Загиров Н. Н., Иванов Е. В. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – № 2010111809/02 ; заявл. 26.03.10 ; опубл. 27.09.11. – 7 с. : ил.

77. Виноградов, Г. А. Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул / Г. А. Виноградов, В. П. Каташинский. – М. : Metallurgiya, 1979. – 224 с.

78. Логинов, Ю. Н. Деформации в пористом прутке из алюминиевого сплава при волочении / Ю. Н. Логинов, Н. Н. Загиров, Е. В. Иванов // *Заготовительные пр-ва в машиностроении*. – 2016. – № 3. – С. 31–35.

79. Третьяков, А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – М. : Metallurgiya, 1973. – 224 с.

80. Gurson, A. L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part – I. Yield criteria and flow rules for porous ductile media / A. L. Gurson // *Journal of Engineering Materials and Technology*. – 1977. – Vol. 99. – P. 2–15.

81. Wu, X. Y. The dynamic growth of a single void in a viscoplastic material under transient hydrostatic loading / X. Y. Wu, K. T. Ramesh, T. W. Wright // *J. of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2003. – Vol. 51. – Iss. 1. – P. 1–26.

82. Pardoen, T. An extended model for void growth and coalescence / T. Pardoen, J. W. Hutchinson // *J. of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2000. – Vol. 48. – Iss. 12. – P. 2467–2512.

83. Логинов, Ю. Н. Формоизменение одиночно расположенной поры в круглой заготовке при волочении / Ю. Н. Логинов, К. В. Еремеева // Кузнечно-штамповочное пр-во. Обработка материалов давлением. – 2009. – № 4. – С. 3–8.

84. Логинов, Ю. Н. Влияние угла рабочей зоны волокна на напряженное состояние в очаге деформации при волочении меди / Ю. Н. Логинов // Цветные металлы. – 2010. – № 3. – С. 94–97.

85. Белокопытов, В. И. Статистические методы управления качеством металлопродукции : учебное пособие / В. И. Белокопытов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. – 108 с.

86. Чашкин, Ю. Р. Математическая статистика. Анализ и обработка данных : учеб. пособие для вузов / Ю. Р. Чашкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Р. н/Д. : Феникс, 2010. – 237 с.

87. Константинов, И. Л. Прокатно-прессово-волочильное производство : учебник / И. Л. Константинов, С. Б. Сидельников, Е. В. Иванов. – М. : ИНФРА-М; Красноярск : Сиб. федер. ун-т. 2019. – 511 с.

88. Загиров, Н. Н. Исследование модифицирующей способности прутковой лигатуры из стружковых отходов силумина / Н. Н. Загиров, Г. П. Усынина, В. И. Аникина // Вестн. Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. – 2012. – № 3. – С. 9–13.

89. Сидельников, С. Б. Сравнительный анализ технологий изготовления сварочной проволоки из эвтектического силумина с применением совмещенных методов обработки / С. Б. Сидельников, Н. Н. Загиров, Ю. Н. Логинов, Р. Е. Соколов // Цветные металлы. – 2017. – № 4. – С. 86–92.

90. Haase, M. Cold extrusion of hot extruded aluminum chips / M. Haase, A. E. Tekkaya // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 217. – P. 356–367.

91. Wang, Y. Enhanced mechanical properties of a chip-based Al–Si–Cu–Fe alloy with an in-situ emulsion decomposition recycled by solid-state processing / Y. Wang, H. Xu, M. Hu, S. Sugiyama, Z. Ji // Results in Physics. – 2019. – Vol. 12. – P. 718–724.

92. Макаренко, Д. Н. Управление качеством композиционного сплава типа

спеченный алюминиевый порошок (САП) / Д. Н. Макаренко // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – Т. 6. – № 1 (20). – С. 64–68.

93. Загиров, Н. Н. Использование сыпучих отходов алюминиевых сплавов для получения прутков и проволоки небольшого сечения / Н. Н. Загиров, А. С. Юриков // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. – 2006. – № 5 (12). – С. 108–110.

94. Довженко, Н. Н. Энергосиловые параметры процесса совмещенной прокатки-прессования / Н. Н. Довженко, И. Н. Довженко, С. Б. Сидельников // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2006. – № 4. – С. 54–61.

95. Загиров, Н. Н. Анализ формирования структурных зон в стружковом материале из сплава АД31, полученного обработкой давлением / Н. Н. Загиров, А. А. Ковалева, В. И. Аникина // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2014. – Т.3. – № 7. – С. 304–309.

96. Логинов, Ю. Н. Исследование влияния угла конусности волокна на механические свойства протянутого полуфабриката / Ю. Н. Логинов, П. Д. Василевский, Л. В. Радионов // Цветные металлы. – 2004. – № 6. – С. 104–106.

97. Колочев, Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов : учебное пособие для вузов / Б. А. Колочев, В. А. Ливанов, В. И. Елагин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1981. – 416 с.

98. Пацекин, В. П. Производство порошковой проволоки / В. П. Пацекин, К. Э. Рахимов. – М. : Металлургия, 1979. – 79 с.

99. Павлов, В. А. Обработка давлением порошков цветных металлов / В. А. Павлов, С. С. Кипарисов, В. В. Щербина. – М. : Металлургия, 1977. – 175 с.

100. Довженко, Н. Н. Система автоматизированного проектирования технологии прессования металлов / Н. Н. Довженко, С. Б. Сидельников, Г. И. Васина. – Красноярск : Краснояр. гос. акад. цв. металлов и золота, 2000. – 194 с.

101. Вайнблат, Ю. М. Диаграммы структурных состояний горячедеформированных алюминиевых сплавов / Ю. М. Вайнблат, П. Ш.

Ланцман, Н. А. Шаршагин // Известия вузов. Цветная металлургия. – 1974. – № 4. – С. 155–161.

102. Güley, V. Effect of die design on the welding quality during solid state recycling of AA6060 chips by hot extrusion / V. Güley, A. Güzel, A. Jäger, NB. Khalifa // Material Science and Engineering : A. – 2012. – Vol. 574. – P. 163–175.

103. Горбунов, Д. Ю. Исследование параметров деформации модифицированных алюминиево-кремниевых сплавов и механических свойств тонкостенных холоднодеформированных полуфабрикатов из них / Д. Ю. Горбунов, Г. В. Ровенский, Т. В. Стайнова // Технология легких сплавов. – 2004. – № 6. – С. 29–32.

104. Sokolov, R. E. Application of Methods Combined Treatment for Obtaining Welding Wire from Silumins / R. E. Sokolov, S. B. Sidelnikov // Журнал Сибирского федерального университета. Серия : Техника и технологии. – 2015. – Т. 8. – № 2. – С. 180–184.

105. Корнилов, В. Н. Устройство для непрерывного прессования гранул алюминиевых сплавов в режиме наложения дополнительных деформаций кручения / В. Н. Корнилов, Н. Н. Загиров // Цветные металлы. – 1995. – № 4. – С.71–73.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
главный инженер ОАО «ИСС»

В.Ф. Шевердов

«04» 04 2010 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по результатам промышленного опробования проволоки из сплава АК12, полученной методами совмещенной обработки

Для испытаний пригодности для пайки специальных конструкций из алюминиевых сплавов на ОАО «ИСС» были представлены образцы проволоки диаметром 2 мм из сплава АК12, полученной учеными кафедры ОМД института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета по трем различным технологиям:

1. С использованием расплава металла по технологии совмещенного литья, прокатки и прессования прутков с последующим волочением (припой 1).
2. Из заготовки, полученной в электромагнитном кристаллизаторе, с применением технологии совмещенной прокатки-прессования прутков с последующим волочением (припой 2).
3. По технологии совмещенной обработки с использованием прессования из сыпучей стружки прутков с последующим волочением (припой 3).

На ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева проведены опытные пайки волноводных трактов из алюминиевых сплавов с использованием указанных припоев и установлено, что качество пайки узлов припоями 1, 2 и 3 при визуальном контроле соответствует требованиям КД.

В связи с вышеизложенным, представленная для испытаний в качестве припоя проволока, изготовленная по различным технологиям позволяет получать с её применением паяные соединения узлов из алюминиевых сплавов в соответствии с требованиями КД узлов конструкции ОАО «ИСС» (соответствует ТУ 1-808-274-2003) и может быть рекомендована для промышленного применения.

Начальник отдела 818 ОАО «ИСС»

В.Д. Чупилко

«07» 04 2010 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

УТВЕРЖДАЮ

Ректор
ФГОУ ВПО «СФУ»
Е.А. Ваганов«18» ноября 2009 г.

УТВЕРЖДАЮ

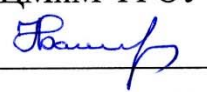
Заместитель генерального директора-
главный инженер ОАО «ИСС»
В.Ф. Шевердов«18» ноября 2009 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом подтверждается, что сварочная проволока из алюминиево-кремниевого сплава АК 12 (Св. АК 12), изготовленная на установке совмещенной обработки СПП-200 (на базе способов и устройств, защищенных авторскими свидетельствами и патентами РФ №1692739, №1667979, №1785459, №1801040, №2100113, № 2100136, №2200644, №2257419, №29675, №67492, №68387, №70828, №68936, №73245, №2334574, №2334588, №2335376) по технологии совмещенной прокатки-прессования из заготовки, полученной на электромагнитном кристаллизаторе, и с применением в качестве заготовки сыпучей стружки, а также технологии совмещенного литья, прокатки и прессования, разработанными коллективом авторов института цветных металлов и материаловедения Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» в составе: Довженко Н.Н., Сидельникова С.Б., Тимофеева В.Н., Загирова Н.Н., Первухина М.В., Соколова Р.Е., Галиева Р.И., Довженко И.Н., Беляева С.В., Ворошилова Д.С., Иванова Е.В., Киселева А.Л., Гладкова Е.В. опробована для пайки образцов волноводных трактов, соответствует ТУ 1-808-274-2003 и по своим технологическим свойствам может применяться для пайки волноводных трактов из алюминиевых сплавов на ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» (г. Железногорск).

Заведующий кафедрой ОМД

ИЦМиМ ФГОУ ВПО «СФУ»


Н.Н. Загиров«18» ноября 2009 г.

Начальник отдела 818

ОАО «ИСС»


В.Д. Чупилко«18» ноября 2009 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ В



УТВЕРЖДАЮ:
 Ректор ИГАОУ ВПО
 «Иркутский федеральный
 университет»

Е.А. Ваганов

2013 г.

А К Т

внедрения в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что нижеперечисленные технические решения внедрены в учебный процесс института цветных металлов и материаловедения, применяются при обучении студентов специальности 150106 «Обработка металлов давлением», бакалавров и магистров направления «Металлургия» и аспирантов специальности 05.16.05 «Обработка металлов давлением» и используются при проведении занятий в рамках разработанных УМКД «Основы технологических процессов обработки металлов давлением», «Непрерывное литье и обработка цветных металлов и сплавов», «Производство ювелирных изделий», а также при выполнении научно-исследовательских курсовых и дипломных работ, магистерских и кандидатских диссертаций, что позволяет существенно повысить эффективность обучения.

1. Сплав на основе палладия. Патент РФ №2392339, 2010 г.
2. Сплав на основе золота. Патент РФ №2391425, 2010 г.
3. Сплав на основе золота белого цвета 585 пробы. Патент РФ № 2430982, 2011 г.
4. Устройство для непрерывной прокатки и прессования. Патент РФ №101390, 2011 г.
5. Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей. Патент РФ №102313, 2011 г.
6. Установка для заливки металла в изложницы. Патент РФ №102314, 2011 г.
7. Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей. Патент РФ №102542, 2011 г.
8. Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования металла. Патент РФ №102550, 2011 г.
9. Устройство для исследования модифицирующей способности лигатур. Патент РФ №104297, 2011 г.
10. Матрица для прессования изделий. Патент РФ №105602, 2011 г.
11. Устройство для получения проволоки и профилей из некомпактных материалов. Патент РФ №2429943, 2011 г.
12. Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей. Патент РФ №119267, 2012 г.
13. Припой для пайки ювелирных изделий из сплава палладия 850 пробы. Патент РФ №2447170, 2012 г.
14. Припой на основе серебра. Патент РФ №2496625, 2013 г.
15. Литейный ювелирный сплав белого цвета на основе палладия. Патент РФ №2479656, 2013 г.
16. Сплав на основе палладия 500 пробы. Патент РФ №2479655, 2013 г.
17. Механоактивированный спеченный железуграфитовый композит для пресс-матриц совмещенного литья и прокатки прессования. Патент РФ №2471881, 2013 г.
18. Установка для испытания на скручивание. Патент РФ №130708, 2013 г.
19. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов. Патент РФ №128529, 2013 г.

Директор ИЦМиМ

В.Н. Баранов