

На правах рукописи



ИВАНОВ Евгений Владимирович

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

05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск–2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент **Загиров Николай Наильич**

Официальные оппоненты:

Полякова Марина Андреевна, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», кафедра технологий обработки материалов, профессор.

Рааб Георгий Иосифович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», научно-исследовательский институт физики перспективных материалов, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк.

Защита состоится 20 марта 2020 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.10 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» по адресу 660025, г. Красноярск, пр. «Красноярский рабочий», д. 95, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» и на сайте <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.099.10



Лесив Елена Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. 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.

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. Это связано с тем, что осуществляемая в настоящее время 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 различного рода отходов обусловлена такими факторами, как повышенный угар металла, снижение выхода годного за счет перехода части металла в шлак, значительные затраты электроэнергии на переплав, высокая трудоемкость при выполнении основных операций, увеличенный объем газопылевых выбросов.

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

Таким образом, совершенствование технологии переработки отходов стружковых материалов за счет исключения стадии переплава и основанной только на применении приемов порошковой металлургии и процессов обработки металлов давлением (ОМД) следует признать актуальной задачей.

Степень разработанности темы. В трудах таких ученых, как В. З. Жилкин, Н. В. Шепельский, В. Н. Щерба, Ю. Г. Дорофеев, Н. Н. Довженко, 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., содержатся данные об особенностях обработки давлением некомпактных металлических материалов, в частности формировании структуры, напряженно-деформированном состоянии и уровне механических свойств получаемых из них длинномерных полуфабрикатов, в том числе и из сплавов на основе алюминия.

Однако, несмотря на достаточное количество научных работ в этой области, большинство технологий переработки в полуфабрикаты и изделия именно металлической стружки, особенно из сплавов на основе алюминия,

* Диссертация выполнена при научной консультации профессора, д. т. н С. Б. Сидельникова

основано на применении несовершенного плавильного передела, что обуславливает целесообразность поиска и опробования новых научно-технологических решений, направленных на реализацию экономически более выгодных вариантов.

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

Выполнение поставленной цели включало формулировку и решение следующих задач:

– 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 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 значимость имеют следующие результаты.

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

2. Выявлены закономерности изменения свойств 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 выбран 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 применительно к изготовлению деформированных полуфабрикатов из стружки сплавов АД31 и АК12.

2. С применением методов математического планирования эксперимента получены регрессионные зависимости для расчета прочностных и пластических 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, характеризующая его состояние, начиная от некомпактного и заканчивая деформированным, в зависимости от условий и параметров термдеформационной 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 привлечением современных методик изучения механических свойств и металлографического анализа, а также на применении численного моделирования с использованием ряда программных комплексов.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты компьютерного моделирования процессов совмещенной прокатки-прессования (программный комплекс 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 характера изменения прочностных и пластических свойств в процессе термдеформационной обработки полуфабрикатов из стружки сплавов АД31 и АК12.

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

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на проводимой ежегодно международной научно-технической Уральской школе-семинаре металловедов – молодых ученых (г. Екатеринбург, 2015-2018 гг.); ежегодных международных конгрессах «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 2015, 2016 гг.); II Международной научно-практической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства» (г. Магнитогорск, 2016 г.); международном конгрессе «Техноген-2019» «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» (г. Екатеринбург, 2019 г.).

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

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, показана научная и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены вопросы классификации отходов и лома алюминиевых сплавов с указанием соответствующих мест образования, отмечены особенности подготовки стружковых отходов к переработке их через переплав. Проанализированы недостатки данного способа возвращения стружки в производственный оборот и указаны направления по его усовершенствованию.

Сформулированы требования к исходному вторичному сырью, используемому для получения изделий и полуфабрикатов из стружковых отходов алюминия и его сплавов, в том числе по предлагаемой в работе схеме.

Обоснован выбор алюминиевых сплавов, отходы которых рассматриваются в работе для изготовления различного рода продукции, а

именно: деформируемый сплав АД31 и литейный сплав АК12, объем стружковых отходов которых составляет значительную долю в общем объеме поступающего в переработку вторичного сырья алюминиевых сплавов. Представлена общая характеристика данных сплавов.

Предложена структурная технологическая схема для переработки стружки алюминиевых сплавов, включающая стадии подготовки стружки к переработке, брикетирования, прессования, дополнительной холодной обработки, отжига.

Во второй главе приведены результаты исследования процесса получения деформированных полуфабрикатов из стружки сплавов АД31 и АК12 с использованием дискретного (циклического) метода прямого горячего прессования.

На первом этапе для решения задачи получения деформированных полуфабрикатов с соответствующим уровнем механических свойств был выбран определенный тип стружки сплава АД31, образующийся при резке пресс-изделий на мерные длины. Переработка ее осуществлялась по схеме, приведенной на рисунке 1.



Рисунок 1 – Технологическая схема получения деформированных полуфабрикатов с помощью метода дискретного прессования

Проведены эксперименты по установлению влияния давления холодного брикетирования на плотность цилиндрических брикетов в зависимости от массы насыпки, результаты которых представлены на рисунке 2.

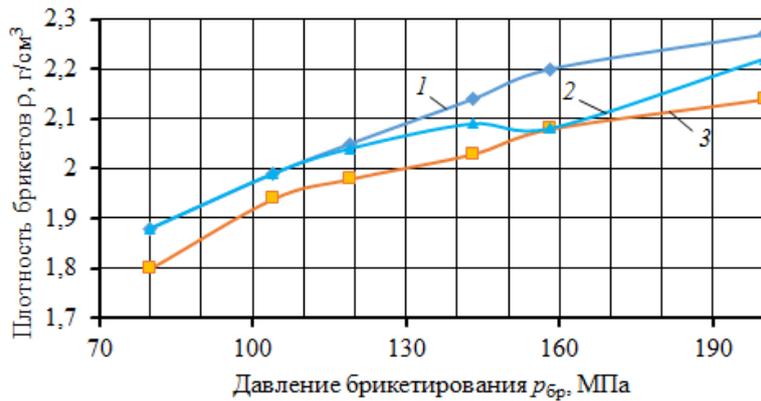


Рисунок 2 – Зависимость плотности ρ от давления холодного брикетирования $p_{бр}$ полуфабрикатов из стружки сплава АД31 при различных значениях массы насыпки, г:
1 – 80; 2 – 100; 3 – 120

Установлено, что минимально необходимый уровень относительной плотности для последующей деформации должен составлять не менее 60÷70 %, для чего нужно приложить давление брикетирования не ниже 80÷100 МПа. При этом чем больше масса насыпки, а следовательно, выше высота получаемого брикета, тем ниже его плотность и существеннее неоднородность ее распределения. 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. 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 %. Далее полученные брикеты использовались как заготовки для изготовления прутков методом дискретного прессования на вертикальном гидравлическом прессе усилием 1 МН. Вид исходной стружки и схема сборки инструмента для горячего прессования представлены на рисунке 3.

Температура и скорость деформации, при которых происходило прессование, каждый раз были идентичными и соответствовали параметрам, рекомендуемым для прессования литых заготовок из сплава АД31, т. е. когда температура заготовки находилась в интервале $\theta = 430 \div 450$ °С, а скорость прессования $v_{пресс} = 50 \div 150$ мм/с. Прессованием получали прутки диаметром 6 мм (коэффициент вытяжки μ при этом составлял: $\mu \approx 56$), 8 мм ($\mu \approx 32$) и 12 мм ($\mu \approx 14$). Выявлено, что независимо от того, с каким коэффициентом вытяжки осуществляется прессование, истечение прутков из матрицы по заданному температурно-скоростному режиму происходит достаточно

устойчиво. Максимальное усилие прессования составляет для сплава АД31 порядка 500 кН, что удовлетворительно согласуется с расчетными данными, полученными с использованием формулы И. Л. Перлина.

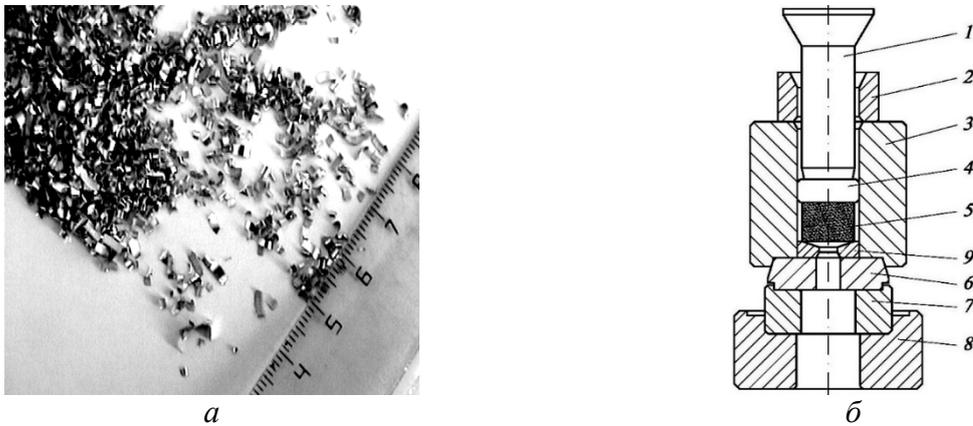


Рисунок 3 – Вид стружки из сплава АД31 (а) и схема сборки прессового инструмента (б) для горячего прессования: 1 – пуансон; 2 – ограничитель хода; 3 – контейнер; 4 – пресс-шайба; 5 – заготовка; 6 – подкладка; 7 – матрицедержатель; 8 – основание; 9 – матрица

В ходе практического опробования было установлено, что с точки зрения формирования определенного уровня механических характеристик прутково-проволочной продукции существенной разницы проводить ли отдельно предварительное горячее или холодное брикетирование стружки нет. Важно в любом случае обеспечить только заданные температурно-скоростные условия деформации в момент начала истечения металла стружки из рабочего отверстия матрицы. Механические свойства прутков после горячего прессования составили: временное сопротивление разрыву $\sigma_B = 130 \div 140$ МПа, относительное удлинение $\delta = 15 \div 17$ %.

Для исследования процесса получения деформированных полуфабрикатов из сплава АК12 была выбрана стружка, образующаяся на одном из переделов при производстве литых дисков колес (рисунок 4, а). Принципиально технологическая схема изготовления прутково-проволочной продукции из стружки сплава АК12 аналогична приведенной на рисунке 1.

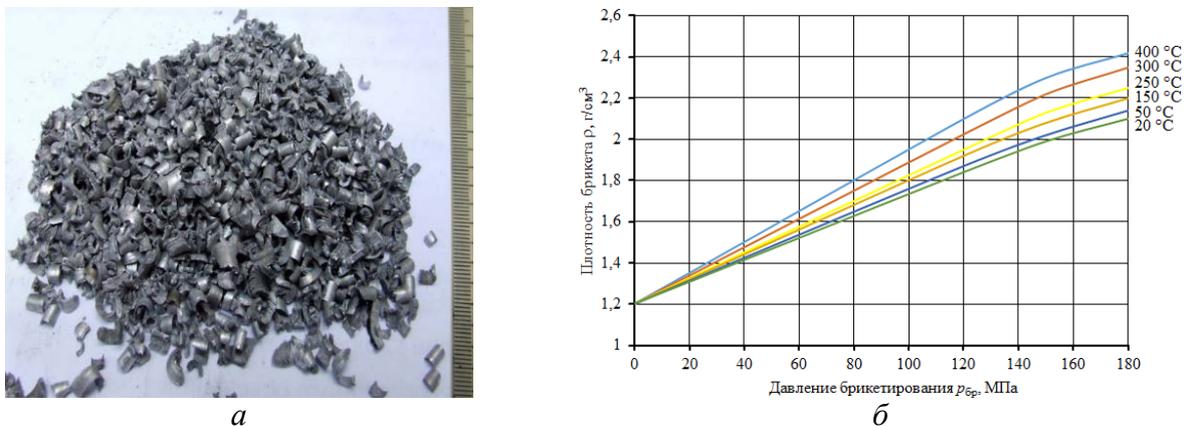


Рисунок 4 – Вид стружки из сплава АК12 (а) и зависимость плотности ρ от давления брикетирования $p_{бр}$ (б) полуфабрикатов из стружки сплава АК12 при различных температурах

Результаты экспериментов по холодному брикетированию показали, 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 устойчиво связанного состояния. При извлечении скомпактированных при таком давлении брикетов из пресс-формы они рассыпались на отдельные фрагменты.

Эксперименты по горячему брикетированию той же стружки при разных температурах брикетирования проводились при следующих параметрах: масса навески стружки составляла около 100 г, диаметр контейнера – 42 мм, максимальное прикладываемое давление брикетирования – 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 4, б. Максимальная интегральная плотность получаемых брикетов при температуре 400 °С составила 2,35÷2,45 г/см³, что соответствовало относительной плотности около 90 %.

Температурно-скоростной режим осуществления операции дискретного прессования в данном случае соответствовал параметрам, рекомендуемым для прессования прутков из труднодеформируемых алюминиевых сплавов: температура нагрева заготовки $\theta = 450\div 470$ °С, скорость прессования $v_{пр} = 50\div 100$ мм/с. Прессованием были получены прутки диаметром 6 мм ($\mu \approx 56$) и 8 мм ($\mu \approx 32$). Сравнительный анализ достигнутых механических характеристик показал, что 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 17 %, относительного сужения ψ – от 30 до 40 %. Для примера на рисунке 5 приведены характерные структуры прутка диаметром 6 мм при реализации традиционного процесса дискретного прессования брикетов цилиндрической формы, полученных из стружки силумина АК12.

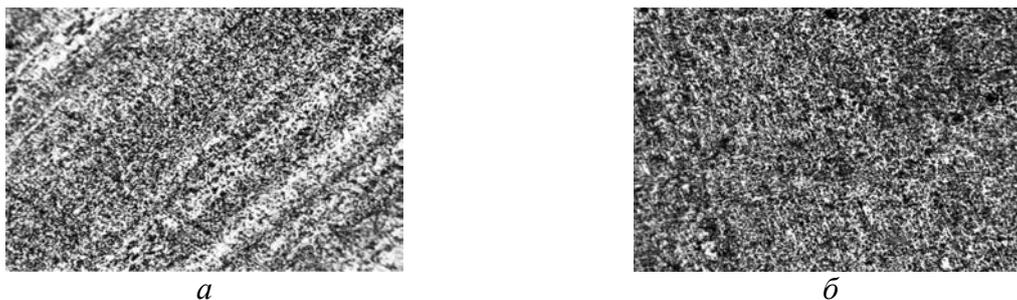


Рисунок 5 – Характерные микроструктуры прессованного прутка диаметром 6 мм из стружки сплава АК12 в продольном (а) и поперечном (б) сечениях, $\times 320$

Металлографический анализ показал, что структура в продольном сечении строчечная, при этом 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.

В третьей главе приведены результаты компьютерного моделирования и исследования процесса изготовления деформированных полуфабрикатов из стружки сплавов АД31 и АК12 на основе применения одного из способов непрерывного прессования, базирующегося на совмещении операций прокатки и прессования.

В соответствии с общей схемой формирования продукции на основе термомодеформационной переработки стружки цветных металлов и сплавов была разработана технологическая схема получения прутков и проволоки с использованием метода совмещенной прокатки-прессования (рисунок б).



Рисунок б – Технологическая схема получения деформированных полуфабрикатов из стружки алюминиевых сплавов с помощью метода совмещенной прокатки-прессования

Математическое моделирование процесса совмещенной прокатки-прессования (СПП) выполняли в программе QFORM V8 в 3D-постановке с наличием одной плоскости симметрии. Материал заготовки – алюминиевый

сплав АД31. На рисунке 7, *а* показано распределение температуры в заготовке. При соприкосновении с более холодным инструментом температура заготовки снижается, что объясняется ее малыми поперечными размерами и значительной разностью между температурами нагрева заготовки и валков. Положительный эффект от такого воздействия может заключаться лишь в том, что металл заготовки не рекристаллизуется и, следовательно, не теряет прочность, достигнутую в результате нагартовки. Приведенное на рисунке 7, *б* распределение степени деформации показывает постепенное увеличение этого параметра, начиная от входа заготовки в валки с резким возрастанием вблизи поверхности матрицы. При этом на входе в очаг деформации распределение степени деформации несимметрично: большую степень деформации получают слои, примыкающие к валку большего катающего диаметра, максимум деформации наблюдается на периферии, а минимум – в центре заготовки.

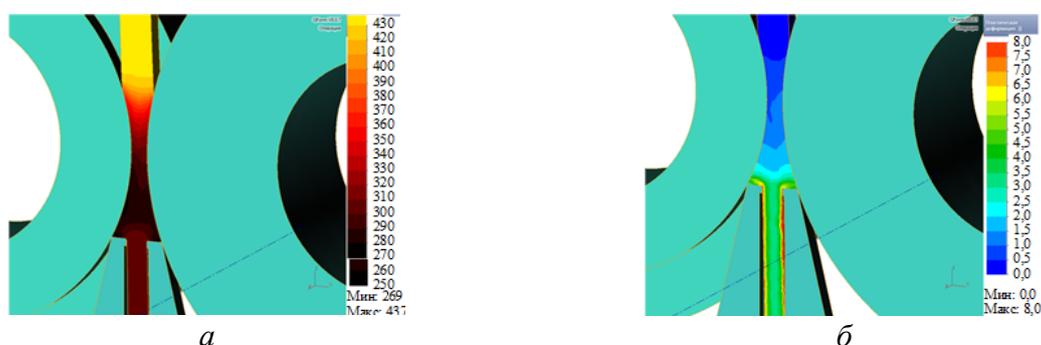


Рисунок 7 – Изменение температуры заготовки (*а*) при прохождении очага деформации и распределение величины степени деформации (*б*) для сплава АД31

Из графиков зависимости величины момента вращения валков от перемещения (рисунок 8, *а*) видно, что момент вращения валка с большим катающим диаметром (выступом) ниже, чем валка с меньшим диаметром (канавкой).

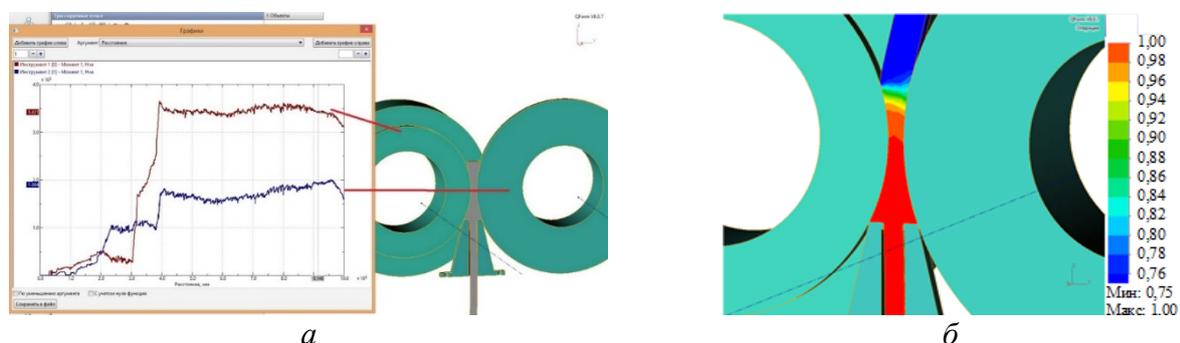
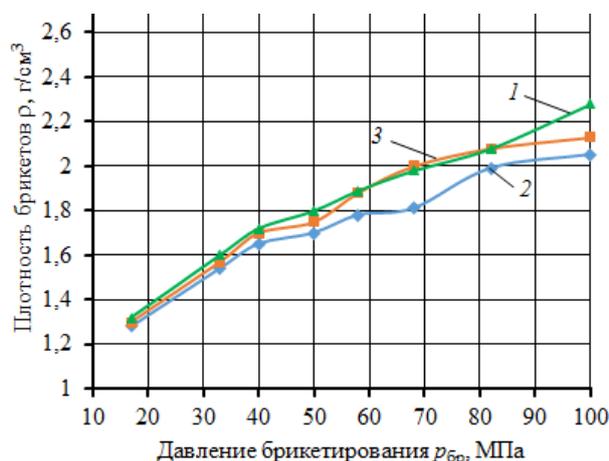


Рисунок 8 – Графики зависимости момента прокатки на валках (*а*) от перемещения (верхняя кривая для валка с меньшим катающим радиусом) и картина распределения относительной плотности в процессе СПП (*б*) для сплава АД31

Объясняется это тем, что у вала с канавкой контактная площадь с обрабатываемым металлом больше, чем у вала с выступом, поэтому значительнее контактное трение.

Из картины распределения относительной плотности материала заготовки видно (рисунок 8, б), что процесс уплотнения начинается сразу же на входе в очаг деформации, причем этот процесс несимметричен: на валке большего диаметра процесс начинается раньше. 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 %. При дальнейшем продвижении металла эта плотность уже не изменяется.

Для проверки результатов моделирования были проведены эксперименты по получению брикетов из исследуемых сплавов и их деформированию методом СПП. Сечение брикета представляло собой прямоугольник размерами 15×200 мм, масса насыпки бралась равной 130, 150 и 180 г. Для брикетирования стружки использовали специальную разъемную пресс-форму. Общий вид брикетов, а также зависимость их плотности от давления холодного брикетирования, представлены на рисунке 9, из которого видно, что максимальная относительная плотность при $p_{бр} = 100$ МПа составляет около 80 %.



а

б

Рисунок 9 – Общий вид (а) и зависимость плотности брикетов из сплава АД31 от давления холодного брикетирования (б) при различных значениях массы насыпки, г:
1 – 130; 2 – 150; 3 – 180

Полученные брикеты перед прокаткой-прессованием нагревали до температуры 480 ± 20 °С в печи сопротивления, общее время нагрева

составляло порядка 60 мин. Число одновременно нагреваемых брикетов равнялось не менее трех. Параллельно проводили подогрев валков установки СПП-200 до температуры $\theta_{в} = 80 \div 100$ °С.

Совмещенной прокаткой-прессованием получали прутки диаметром 7 и 9 мм, уровень прочностных и пластических характеристик которых оказался приблизительно одинаковым и составил: временное сопротивление разрыву – $180 \div 190$ МПа, относительное удлинение – $12 \div 16$ %, относительное сужение – $38 \div 42$ %.

Анализ результатов металлографических исследований прутков, полученных из стружки сплава АД31 (рисунок 10), показал, что необходимо увеличивать степень деформации при прессовании, так как она 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. Мостиков схватывания между стружками не наблюдается, т. е. формирование физического контакта протекает в основном на микронеровностях стружки с частичным растеканием (но не разрушением) окисной пленки по всей контактной поверхности.

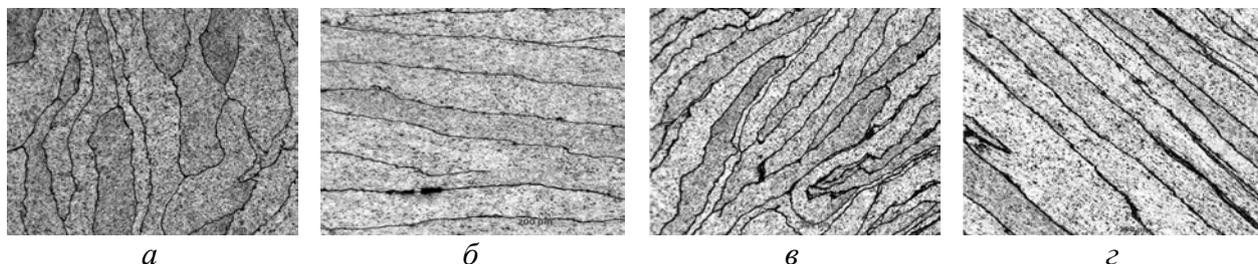


Рисунок 10 – Характерная микроструктура прутков из стружки сплава АД31 в поперечном (*а, в*) и продольном (*б, г*) направлениях:
а, б – пруток диаметром 9 мм; *в, г* – пруток диаметром 7 мм, $\times 160$

Полуфабрикаты из стружки сплава АК12 под СПП формовали уже горячим брикетированием при температуре $\theta_{бр} = 350$ °С и давлении брикетирования $p_{бр} = 100$ МПа, относительная плотность при этом составила $85 \div 87$ %. Температура нагрева брикетов перед СПП была выбрана равной $500 \div 520$ °С, общее время нагрева составило 60 мин. В результате были изготовлены прутки диаметром 7 и 9 мм, причем как и ранее, уровень прочностных и пластических свойств полученных прутков составил практически одинаковую величину: временное сопротивление разрыву – $220 \div 230$ МПа, относительное удлинение – $5 \div 7$ %, относительное сужение – $8 \div 9$ %. Характерные структуры прутков принципиальных особенностей по сравнению с прутками из стружки сплава АД31 также не имеют.

Сопоставление механических свойств прутков, изготовленных с применением дискретного прессования и метода СПП из одних и тех же типов стружки, показало, что из-за разницы температурных условий реализации процессов прутки, полученные методом СПП, целесообразно перед их холодной обработкой волочением подвергнуть предварительному отжигу по следующим режимам:

– для сплава АД31: $\theta_{\text{отж}} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{отж}} = 60 \text{ мин}$;

– для сплава АК12: $\theta_{\text{отж}} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{отж}} = 60 \text{ мин}$.

После проведения отжига прутков прочностные и пластические характеристики составили:

– для сплава АД31: временное сопротивление разрыву – $125 \div 135 \text{ МПа}$, относительное удлинение – $17 \div 18 \%$, относительное сужение – $50 \div 55 \%$;

– для сплава АК12: временное сопротивление разрыву – $105 \div 115 \text{ МПа}$, относительное сужение – $10 \div 11 \%$.

В качестве усовершенствованного варианта установки совмещенной прокатки-прессования, адаптированной к переработке сыпучих стружковых отходов алюминиевых сплавов, в работе предложена конструкция, защищенная патентом РФ, включающая подогреваемый контейнер, форкамеру с нагревателями, приводной шнек, расположенный в контейнере, валок с ручьем и валок с выступом, образующие закрытый калибр, на выходе из которого установлена матрица с гидроприжимом. Это устройство позволяет получать длиномерные деформированные полуфабрикаты из стружки алюминия и его сплавов. Одним из основных элементов устройства является форкамера специальной конструкции с встроенными нагревателями, в которой происходит предварительное брикетирование стружки и формирование прямоугольной заготовки с необходимой степенью уплотнения, достаточной для последующей деформации.

В четвертой главе приведены результаты компьютерного моделирования и исследования процесса волочения прутков, полученных дискретным и непрерывным прессованием из стружки сплавов АД31 и АК12.

Моделирование процесса волочения пористого прутка выполнено в программе ABAQUS. Материал заготовки – алюминиевый сплав АД31, начальная относительная плотность материала равна 90 %. В качестве переменного параметра был выбран коэффициент трения, который варьировали на четырех уровнях: 0,05; 0,1; 0,2 и 0,3.

Влияние коэффициента трения на процесс уплотнения показано на рисунке 11 (для примера приведено распределение относительной плотности для коэффициентов трения 0,05 и 0,3). Видно, что при небольшом 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 в центре появляется третья зона с пониженным до исходного значением плотности, которая расширяется при увеличении коэффициента трения до 0,3.

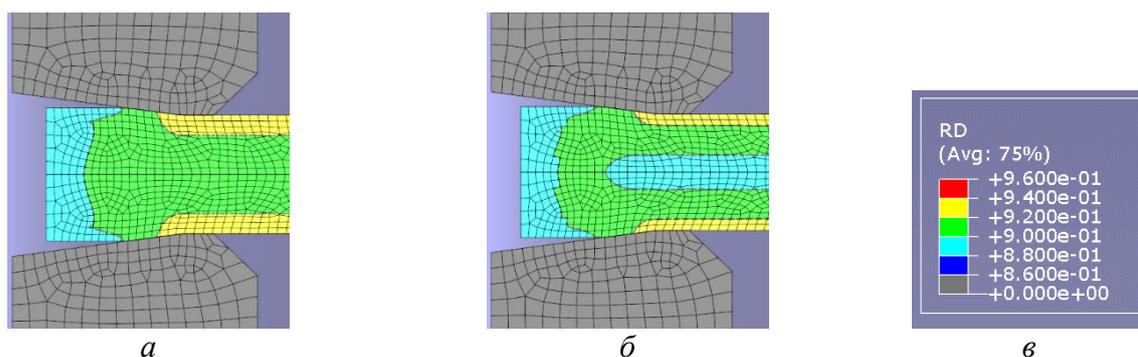


Рисунок 11 – Распределение относительной плотности RD в процессе волочения прутка при коэффициентах трения: *a* – 0,05; *б* – 0,3; *в* – цветовой ключ

Результаты расчета распределения величины Pressure (обратная по знаку величина по отношению к гидростатическому давлению) представлены на рисунке 12. Видно, что при малом коэффициенте трения зоны интенсивного сжатия располагаются в периферийных областях заготовки, примыкающих к поверхности волоки. На уровне калибрующего пояска возникают зоны растяжения, которые обусловлены действием тянущей силы. При увеличении коэффициента трения зоны действия напряжений сжатия все в большей степени локализуются вблизи контактных поверхностей, не проникая в центральную область. Такая картина качественно согласуется с распределением плотности, приведенным на рисунке 11.

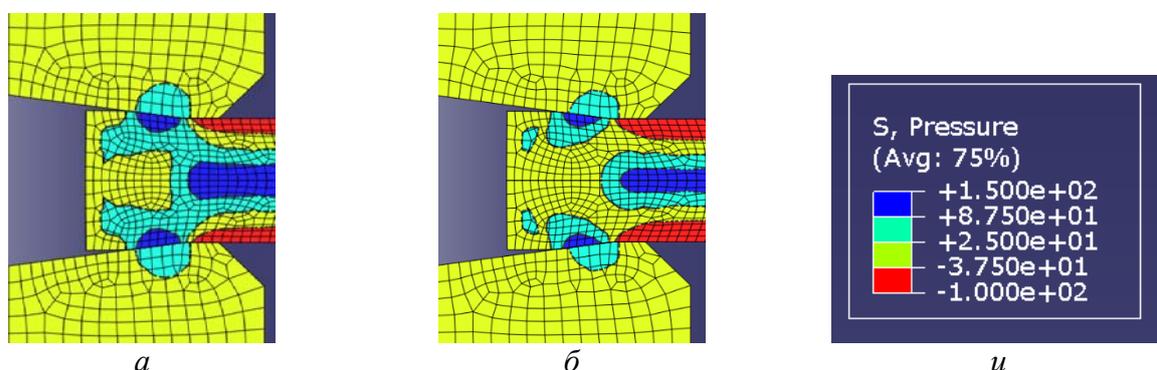


Рисунок 12 – Распределение величины Pressure при различных коэффициентах трения: *a* – 0,05; *б* – 0,3; *в* – цветовой ключ

Картина распределения степени деформации PEEQ (рисунок 13) отражает увеличение этой величины от входа в очаг деформации до выхода из него и характерное ее неравномерное распределение по радиусу.

Максимальное значение данного показателя свойственно для периферии проволоки, а наименьшее для центральной области. 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 *S12*, отражена на рисунке 14 областями и линиями равного уровня.

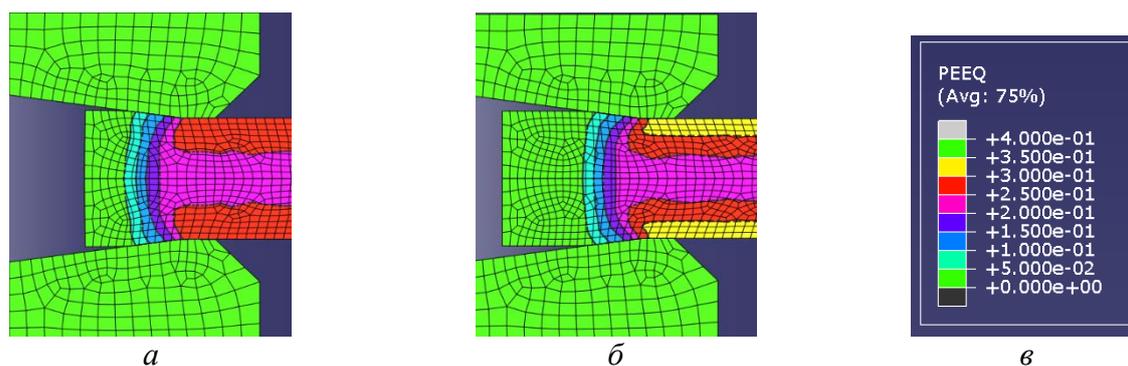


Рисунок 13 – Распределение степени деформации PEEQ при различных коэффициентах трения: $a - 0,05$; $b - 0,3$; $в$ – цветовой ключ

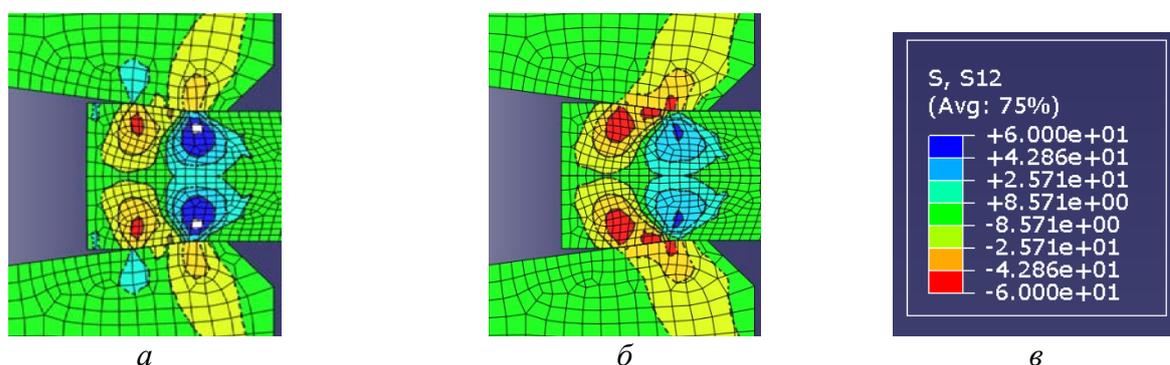


Рисунок 14 – Распределение касательных напряжений S_{12} в процессе волочения прутка при различных коэффициентах трения: $a - 0,05$; $b - 0,3$; $в$ – цветовой ключ

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. Поэтому вклад повышенных касательных напряжений в эффект увеличения плотности также не может быть отвергнут.

Таким образом, обобщая представленные выше результаты моделирования, можно спрогнозировать 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.

В практической части данного раздела с использованием методов полного факторного эксперимента и наименьших квадратов были выведены уравнения регрессии для оценки характера изменения временного сопротивления разрыву σ_b и относительного удлинения δ при холодном волочении проволоки, получаемой из стружки сплавов АД31 и АК12, в

зависимости от суммарного относительного обжатия ε , выраженного в процентах.

Для сплава АД31 эти уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned}\sigma_B &= 132,9 + 2,177 \cdot \varepsilon - 0,011 \cdot \varepsilon^2; \\ \delta &= 15,8 - 0,226 \cdot \varepsilon + 0,001 \cdot \varepsilon^2.\end{aligned}$$

Для сплава АК12:

$$\begin{aligned}\sigma_B &= 167,2 + 2,747 \cdot \varepsilon - 0,016 \cdot \varepsilon^2; \\ \delta &= 14,4 - 0,272 \cdot \varepsilon + 0,002 \cdot \varepsilon^2.\end{aligned}$$

На рисунке 15 показано изменение прочностных (σ_B) и пластических (δ) свойств холоднотянутой проволоки, исходной заготовкой для которой служили прутки диаметром 6 мм из холоднобрикетированной стружки сплава АД31.

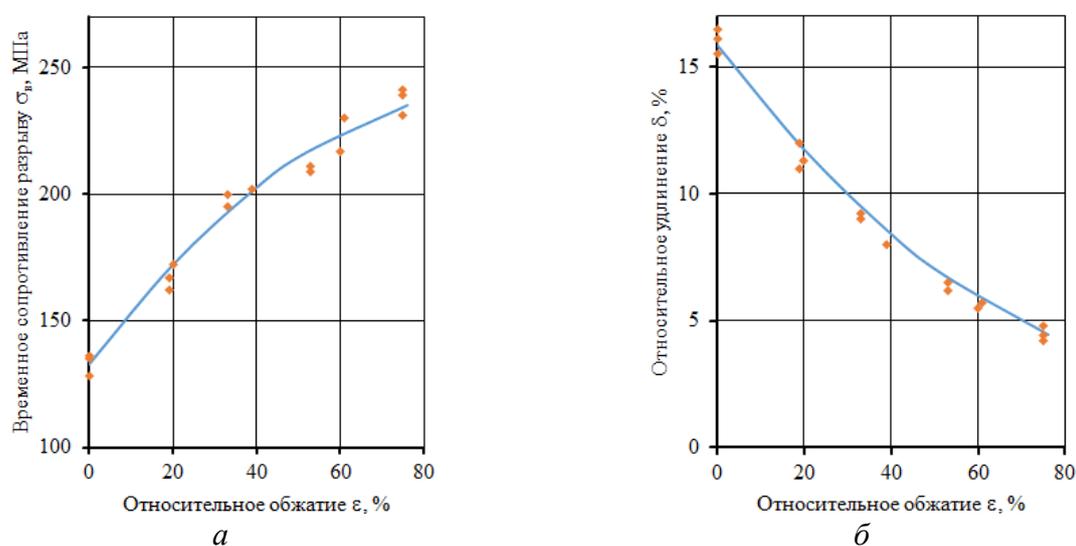


Рисунок 15 – Зависимости временного сопротивления разрыву (а) и относительного удлинения (б) от суммарной степени деформации полуфабрикатов из стружки сплава АД31 после дискретного прессования ($\varepsilon = 0$) и волочения (точки – экспериментальные значения, линии – данные в соответствии с уравнениями регрессии)

Установлено, что погрешность расчетов по приведенным выше формулам не превышает 5% при сравнении их с соответствующими экспериментальными данными.

На рисунке 16 для иллюстрации приведены микроструктуры проволок различного диаметра, полученных из прутка диаметром 6 мм.



Рисунок 16 – Микроструктура поперечного сечения проволоки из сплава АД31 диаметрами 5,0 (а) 3,7 (б), 2,8 (в) и 1 мм (г), полученной из прутка диаметром 6 мм, ($\times 160$)

Их анализ показал, что картина изменения микроструктуры поперечного сечения проволок с увеличением относительного обжатия в общем-то достаточно логично, т.е. по мере уменьшения диаметра протянутой проволоки происходит измельчение структуры с постепенно усиливающейся раздробленностью в приповерхностных слоях проволоки.

Потенциально областью практического применения прутков и проволоки из стружковых отходов сплава АД31 может являться использование их в качестве основы для введения в соответствующие расплавы специальных порошковых добавок модифицирующего назначения. Кроме того, полученная из стружки указанного сплава проволока может рассматриваться как изделие ширпотреба (без особых требований к структуре), например, служить в качестве обвязочной проволоки неотчетливого назначения. Для такой продукции, согласно технологическим рекомендациям, в твердом (неотожженном) состоянии временное сопротивление разрыву проволоки должно быть не ниже 140÷160 МПа, а относительное удлинение – не ниже 2÷3 %. Результаты механических испытаний проволоки различного диаметра из стружки сплава АК12 представлены на рисунке 17.

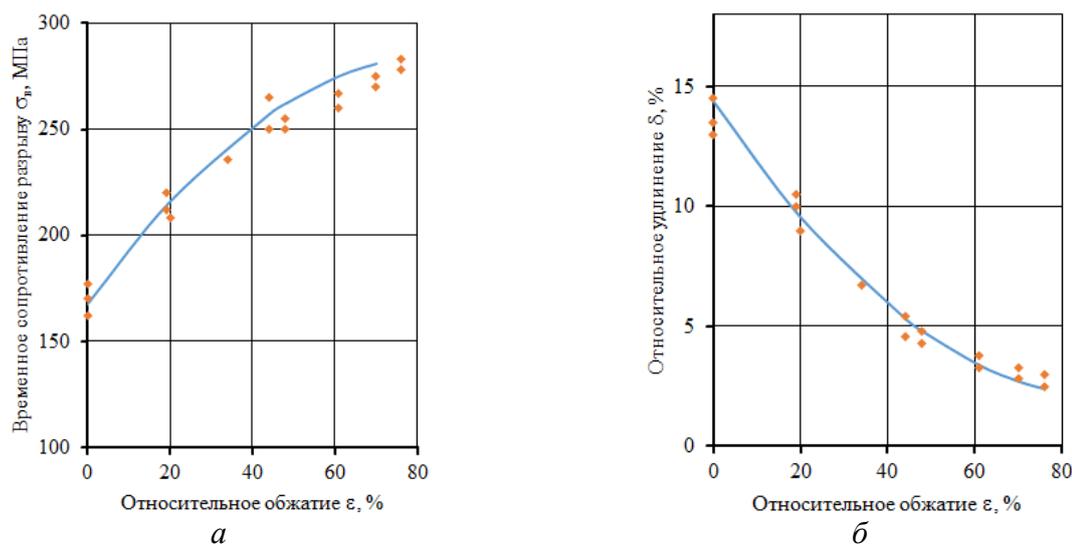


Рисунок 17 – Изменение временного сопротивления разрыву (*a*) и относительного удлинения (*б*) полуфабрикатов из стружки сплава АК12 после дискретного прессования ($\epsilon = 0$) и волочения (точки – экспериментальные значения, линии – данные в соответствии с уравнениями регрессии)

Изучение микроструктуры (рисунок 18) на примере проволоки диаметрами 6,6 и 5,0 мм, каждая из которых была протянута из соответствующего прутка с суммарным относительным обжатием 30 %, 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 дело с однородным сплошным материалом, 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.

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).

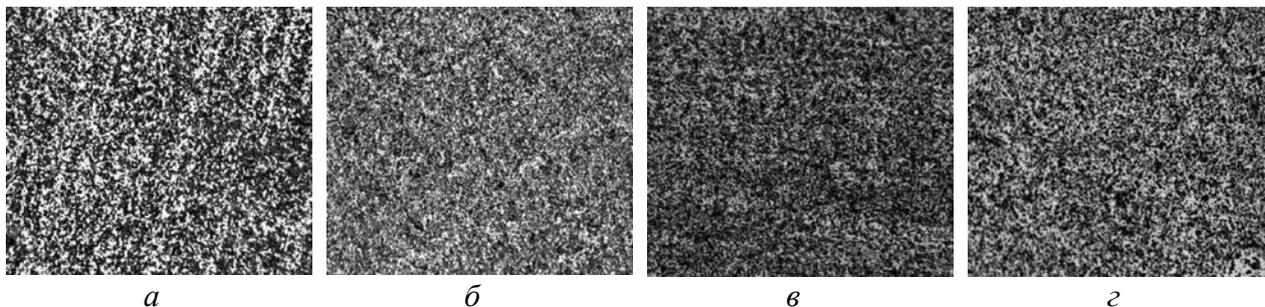


Рисунок 18 – Характерные микроструктуры проволоки диаметрами 5 мм (*а, б*) и 6,6 мм (*в, г*), полученных из отпрессованных прутков диаметрами, соответственно, 6 и 8 мм: *а, в* – продольное сечение; *б, г* – поперечное сечение, ($\times 320$)

Кроме того, сварочная проволока диаметром 2 мм, изготовленная по предложенным технологическим схемам из стружки сплава АК12, прошла успешное промышленное опробование для пайки конструкций специального назначения из алюминиевых сплавов на ОАО «Информационные спутниковые системы» (г. Железногорск), что подтверждено соответствующим актом внедрения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

По итогам выполненного исследования можно заключить, что поставленная цель достигнута, а задачи выполнены в полном объеме.

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 неотчетливого 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.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. **Иванов, Е. В.** 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: СФУ, 2019. – 204 с.

2. **Иванов, Е. В.** 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. 139–143 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

3. **Иванов, Е. В.** 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, Т. 17, № 4. – С. 168–174 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

4. **Иванов, Е. В.** Вариант технологии получения прутково-проволочной продукции из силумина АК12 / Ю. Н. Логинов, С. Б. Сидельников, Н. Н. Загиров, Е. В. Иванов // *Металлург*. – 2018, № 6. – С. 89–95 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

5. **Иванов, Е. В.** Сопротивление деформации пористого силумина при повышенных температурах / Ю. Н. Логинов, Н. Н. Загиров, Е. В. Иванов, Р. Р. Ризаханов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2018, Т.16, № 8. – С. 354–357 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

6. **Иванов, Е. В.** 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 материалов давлением. – 2017, № 3. – С. 38–41 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

7. **Иванов, Е. В.** Деформации в пористом прутке из алюминиевого сплава при волочении / Ю. Н. Логинов, Н. Н. Загиров, Е. В. Иванов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016, № 3. – С. 31–35 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

8. **Иванов, Е. В.** 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 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

9. **Иванов, Е. В.** 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 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

10. **Иванов, Е. В.** 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 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

11. **Иванов, Е. В.** 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 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

12. **Иванов, Е. В.** 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 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

13. **Ivanov, E. V.** Alternative technology for manufacturing rod-wire products from AK12 silumin / Yu. N. Loginov, S. B. Sidelnikov, N. N. Zagirov, E. V. Ivanov // *Metallurgist*. – 2018. V.62. – P. 587–596 (**издание, входящее в базу цитирования Scopus**).

14. **Ivanov, E. V.** 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. – V.60 – P. 561–565 (**издание, входящее в базу цитирования Scopus**).

15. **Ivanov, E. V.** 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. V.53 – P. 145–149 (**издание, входящее в базу цитирования Scopus**).

16. **Иванов, Е. В.** Применение методов обработки давлением для твердотельной переработки стружковых отходов силумина / Н. Н. Загиров, Ю. Н. Логинов, Е. В. Иванов, Р. Р. Ризаханов // «Техноген-2019»: труды конгресса. «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований». – Екатеринбург: УрО РАН, 2019. – С. 365–368.

17. **Иванов, Е. В.** Неоднородность уплотнения заготовки в процессе прокатки-прессования / А. А. Ершов, Е. В. Иванов // *Уральская школа молодых металлургов: сб. материалов XIX международной научно-практической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых*. – Екатеринбург: УрФУ, 2018. – С. 470–473.

18. **Иванов, Е. В.** Конечно-элементный анализ процесса прокатки-прессования / А. А. Ершов, Ю. Н. Логинов, Н. Н. Загиров, Е. В. Иванов // *Уральская школа молодых металлургов: сб. материалов XVIII международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых*. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – С. 690–693.

19. **Иванов, Е. В.** Механические свойства полуфабрикатов из сыпучей стружки сплава АД31, полученных с использованием адаптированного способа дискретной экструзии / Е. В. Иванов, Н. И. Загорская, Н. Н. Загиров, Ю. Н. Логинов // *Уральская школа молодых металлургов: сб. материалов XVII международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых*. – Екатеринбург: УрФУ, 2016, Т.2. – С. 65–68.

20. **Иванов, Е. В.** Сравнительный анализ технологических схем изготовления прутков и проволоки из сыпучих стружковых отходов сплава АД31 / И. Н. Гигель, Е. В. Иванов, Н. И. Загорская, Я. В. Ковалева // «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства»: сб. материалов II международной научно-практической конференции. – Магнитогорск, 2016. – С. 68–69.

21. **Иванов, Е. В.** Основные подходы по переработке сыпучих стружковых отходов сплава АД31 в полуфабрикаты и изделия различного

назначения / Н. Н. Загиров, Е. В. Иванов, И. Н. Гигель // Цветные металлы и минералы – 2016: сб. тезисов докладов VIII международного конгресса. – Красноярск: Научно-инновационный центр, – 2016. – С. 280–281.

22. **Иванов, Е. В.** Сопоставление структуры и свойств прутково-проволочной продукции, получаемой из стружки силумина с использованием дискретного прессования и способа совмещенной прокатки-прессования / Н. Н. Загиров, Е. В. Иванов, К. В. Бурмистров, А. А. Ковалева, В. И. Аникина // Цветные металлы и минералы – 2015: сб. тезисов докладов VII международного конгресса. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2015. – С. 416–417.

23. **Иванов, Е. В.** Сравнительная оценка свойств прутково-проволочной продукции, получаемой из стружки силумина с использованием дискретного прессования и способа совмещенной прокатки-прессования / Н. Н. Загиров, Е. В. Иванов, И. Н. Гигель, Я. В. Ковалева // Уральская школа молодых металлургов: сб. материалов XVI международной научно-практической Уральская школы-семинара металлургов – молодых ученых. – Екатеринбург: УрФУ, 2015, Т.1. – С. 75–78.

24. **Иванов, Е. В.** 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.

25. Пат. №2429943 Российская Федерация, МПК В22F 3/18, В22F 5/12, В21С 37/04, В21В 1/10. Устройство для получения проволоки и профилей из некомпактных материалов / С. Б. Сидельников, Н. Н. Загиров, **Е. В. Иванов**, В. М. Беспалов; патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – № 2010111809/02; заявл. 03.26.2010; опубл. 27.09.2011, Бюл. № 27.