

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»

На правах рукописи



БИРЮКОВА ОЛЕСЯ ДМИТРИЕВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА
АСИММЕТРИЧНОЙ АККУМУЛИРУЮЩЕЙ ПРОКАТКИ
ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
В ЛИСТОВЫХ СЛОИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТАХ**

Специальность 2.6.4. Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – профессор, доктор технических наук
Песин Александр Моисеевич

Магнитогорск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	15
1.1 Современное состояние вопроса производства листовых слоистых композитов.....	15
1.2 Использование методов интенсивной пластической деформации	22
1.3 Описание процессов асимметричного деформирования.....	26
1.3.1 Процесс асимметричной прокатки	26
1.3.2 Характеристика и использование аккумулялирующей прокатки....	33
1.4 Постановка цели и задач работы.....	39
ГЛАВА 2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ АСИММЕТРИЧНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ.....	41
2.1 Постановка задачи для численного исследования асимметричной аккумулялирующей прокатки как способа обработки листовых слоистых алюминиевых композитов.....	41
2.1.1 Граничные и начальные условия для процесса компьютерного моделирования асимметричной аккумулялирующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов.....	44
2.2 Влияние кинематической асимметрии на деформированное состояние в листовых слоистых алюминиевых композитах при асимметричной аккумулялирующей прокатке.....	48
2.3 Компьютерное моделирование изгиба полосы при обработке листовых слоистых алюминиевых композитов	52
2.4 Исследование поведения межслойной границы в листовых слоистых алюминиевых композитах при асимметричной аккумулялирующей прокатке.....	55
2.5 Анализ силовых параметров процесса асимметричной аккумулялирующей прокатки листовых слоистых алюминиевых	

КОМПОЗИТОВ.....	62
2.6 Выводы по главе 2.....	64
ГЛАВА 3. ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ И КОРРЕКТИРОВКА РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ЛИСТОВЫХ СЛОИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ.....	66
3.1 Материалы, оборудование и методы исследования для получения листовых слоистых алюминиевых композитов.....	66
3.2 Анализ возможностей аккумулирующей прокатки при симметричном и асимметричном деформировании листовых слоистых алюминиевых композитов	69
3.3 Проверка адекватности компьютерных моделей процесса асимметричного деформирования листовых слоистых алюминиевых композитов.....	72
3.4 Экспериментальное определение рациональных параметров асимметричной аккумулирующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов.....	74
3.5 Выводы по главе 3.....	90
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ И НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АСИММЕТРИЧНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛИСТОВЫХ СЛОИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ.....	93
4.1 Рациональные технологические режимы для обработки листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070.....	94
4.2 Рациональные технологические режимы для обработки листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/2024.....	96
4.3 Особенности использования листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024.....	98
4.4 Разработка новых технических решений.....	102
4.5 Выводы по главе 4.....	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	105

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	108
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	138

ВВЕДЕНИЕ*

Актуальность темы исследования. В современном мире повышается интерес к использованию листовых слоистых композитов в различных отраслях производства. В отличие от однослойных, слоистые материалы являются более прочным, коррозионностойким и технологичным сырьем для производства деталей различного назначения. Стоит заметить, что легирование, как способ улучшения качества и свойств монометалла (состоящего из одного слоя), практически себя исчерпало. Кроме того, материальные затраты на процессы разработки, сертификации и внедрения новых марок различных сплавов постоянно растут, что существенно снижает выгоду от их использования с экономической точки зрения. Листовой слоистый композит может быть изготовлен из двух слоев металла, которые могут быть разнородными (алюминий – сталь, титан – никель и т.д.) или же иметь в качестве основы один металл (сталь 09Г2С – сталь 12Х18Н10Т, алюминий 1070 – алюминий 5083 и т.д.).

В работе рассматриваются листовые слоистые композиты, изготовленные из алюминиевых сплавов. Алюминиевая продукция широко применяется при производстве целого ряда транспортных средств, начиная от автомобилей и заканчивая космическими кораблями. Алюминий – это уникальный материал, который при комнатной температуре обладает высокими значениями пластичности и коррозионной стойкости. При значительных отрицательных температурах, пластичность, также как и прочность, возрастает. Данные характеристики позволяют широко использовать алюминиевую продукцию в ответственных конструкциях.

Продукция из листовых слоистых алюминиевых композитов может получить распространение в таких отраслях как:

- 1) Космическая отрасль (топливные баки ракет носителей и космических кораблей для окислителя и горючего сжиженного топлива с толщиной металла 0,4 – 2,5 мм [1]). Данная отрасль набирает популярность в последние годы как в Америке (Falcon 9, Falcon Heavy, Alpha, Dragon, Starship), так и в России

* Работа выполнена при научной консультации к.т.н. Пустовойтова Д.О.

(Протон-М, Прогресс МС-12, Союз МС-14, Ангара). Остро стоит проблема техногенного засорения из-за взрывов космических объектов (в данном случае необходимо повышать прочность металлических материалов, стараясь снизить их вес для экономии топлива). Кроме того, рассматривается возможность замены керосинового топлива на водородное. Данная замена сталкивается с рядом проблем: сложностью хранения, транспортировки и эксплуатации. Взрывоопасность и низкая стойкость агрегатов хранения в данный момент не позволяют произвести такого рода замену, так как водород охрупчивает ряд металлов из которых изготавливают топливные баки. Возможность использования водородного топлива должна подтверждаться в соответствии с ГОСТ Р 55891-2013. Металлические материалы для корпуса топливного бака изготавливается из алюминиевых сплавов 5 серии системы Al – Mg по ГОСТ 21631-76, ГОСТ 4784-97, EN 515, EN 573-3, EN 485-1,2,4.

2) Автомобилестроение (габаритные части кузова автомобиля – капот, крылья, крыша, двери, днище с толщиной металла 0,6 – 1,3 мм). Как и в предыдущих случаях стоит затронуть проблему экологии: образование парниковых газов во время эксплуатации автомобиля ведет к торможению экологического развития. В странах европейского союза установлены нормы по количеству возможных выбросов оксида углерода, требования к которым постоянно растут. В 2021 году автопроизводители должны обеспечить снижение уровня выбросов на 40 %. Известно, что при повышении веса конструкции автомобиля, происходит повышения уровня расхода топлива: например, автомобиль весом 1,5 т (стандартный седан) расходует в среднем 10 литров бензина на 100 км, в то время как расход автомобиля весом 3 т (внедорожник) составляет более 20 литров горючего на 100 км. Снижение веса автомобиля при сохранении прочностных характеристик позволит не только улучшить экологическую обстановку, но и сделать автомобиль более безопасным в эксплуатации, а также повысить устойчивость от случайной деформации. В 90-е гг. для производства кузовных частей автомобилей широко использовались алюминиевые сплавы 2 серии [2]. В настоящее время используются материалы,

изготавливаемые чаще всего из алюминиевых сплавов 6 серии системы Al – Mg – Si – Cu по ГОСТ 21631-76, ГОСТ 4784-97, EN 515, EN 573-3, EN 485-1,2,4 для автомобилей марок Audi, BMW, Porsche, Tesla, Jaguar, Ferrari и т.д., а также из низкоуглеродистых марок сталей по ГОСТ 9045-93, EN 10130 для автомобилей марок Лада, Chevrolet, Nissan, Volkswagen, Skoda, Peugeot и т.д.

Это обуславливает постоянное повышение требований к качеству алюминиевой металлопродукции. Основной упор должен делаться на разработку и совершенствование технологий производства данной продукции для повышения механических характеристик: получения высоких показателей прочности, твёрдости и удовлетворительного значения пластичности. Методы интенсивной пластической деформации [3 – 23] являются перспективными для получения ультрамелкозернистой структуры в алюминиевых сплавах, позволяющей достичь требуемых параметров по механическим свойствам.

Однако наряду с большими достоинствами этих методов, они имеют один существенный недостаток, заключающийся в сложности, а часто невозможности их использования для производства длинномерных изделий. Это существенно ограничивает использование этих методов в промышленности. Исходя из этого, ставится задача по разработке технологий обработки материалов специальными методами, позволяющими получать длинномерные изделия с высокими значениями комплекса механических свойств. К таким методам можно отнести асимметричную аккумулялирующую прокатку [24].

Степень разработанности темы исследования. Диссертационная работа является самостоятельным и логически завершенным научным исследованием, посвященным решению актуальной задачи получения листовых слоистых алюминиевых композитов с улучшенными механическими свойствами на основе асимметричной аккумулялирующей прокатки. Изучением закономерностей поведения слоистых материалов при пластической деформации занимались: Г.Э. Аркулис, В.С. Блинов, А.Г. Кобелев, Ю.П. Трыков и т.д. Однако в их работах не рассматривается процесс асимметричной аккумулялирующей прокатки в широком диапазоне отношения скоростей рабочих валков ($V_1/V_2 = 1 \dots 5$).

Цель исследования: Создание больших сдвиговых деформаций при асимметричной аккумулярующей прокатке для повышения механических и эксплуатационных свойств листовых слоистых алюминиевых композитов.

Задачи, решаемые для достижения цели:

1. Разработка компьютерных моделей в программных комплексах «DEFORM 2D/3D» и «QFORM 2D/3D» и численное исследование влияния различных параметров асимметричной аккумулярующей прокатки на напряженно-деформированное состояние листовых слоистых алюминиевых композитов (5083/1070, 5083/2024, 6061/1070, 6061/2024), силовые параметры процессов, а также характер движения металла на выходе из очага деформации;

2. Определение в результате численного исследования условий получения высоких значений сдвиговой деформации в листовых слоистых алюминиевых композитах;

3. Проверка адекватности результатов компьютерного моделирования и экспериментальное исследование влияния параметров асимметричной аккумулярующей прокатки на механические свойства листовых слоистых алюминиевых композитов;

4. Разработка рациональных технологических схем и режимов асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов для их использования в космической и автомобильной отраслях.

Научная новизна.

1. Определены необходимые границы областей гарантированного одновременного повышения прочности (σ_b не менее 300 МПа) и технологической пластичности проката (с ростом коэффициента вытяжки до 5,5), отличающиеся соотношением суммарных эквивалентных деформаций ($\epsilon > 3$) и углов сдвига ($\varphi > 70^\circ$) для листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024 с конечной толщиной 0,7 – 1,5 мм, а также показано, что для попадания в данные области необходимо провести не менее 2 циклов асимметричной аккумулярующей прокатки;

2. Для процесса асимметричной аккумулярующей прокатки листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 впервые найден диапазон отношений скоростей рабочих валков ($V_1/V_2 = 2,5 \dots 4$), отличающийся тем, что такой диапазон обеспечивает максимальные относительное удлинение δ (12%) и отношение временного сопротивления разрыву σ_b к пределу текучести σ_T (1,55), а также прямолинейное движение металла на выходе из очага деформации;

3. Показано, что с увеличением отношения скоростей рабочих валков до 4 при тёплой (температура нагрева 380°C) асимметричной аккумулярующей прокатке листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 (при одинаковом межвалковом зазоре) относительное обжатие увеличивается до 67%, а усилие прокатки снижается до 600 кН по сравнению с относительным обжатием 37% и усилием прокатки 1330 кН при равных скоростях рабочих валков.

4. Впервые численно найдены зависимости распределений слоёв в листовых слоистых алюминиевых композитах 5083/2024 и 5083/1070 по длине очага деформации при обжатии 50% и соотношении скоростей рабочих валков от 1 до 2 при асимметричной аккумулярующей прокатке, причём максимальная глубина внедрения слоя 5083 в композите 5083/2024 составляет 0,21 мкм, а максимальная глубина внедрения слоя 1070 в композите 5083/1070 – 0,15 мкм.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. В работе развивается подход, разработанный на кафедре ТОМ ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова», по использованию асимметричной аккумулярующей прокатки для производства листовых слоистых алюминиевых композитов (5083/1070 и 5083/2024) с улучшенными механическими свойствами.

2. По результатам компьютерного моделирования и экспериментального исследования были выявлены основные технологические параметры процесса (количество циклов – 2; отношение скоростей рабочих валков 1,25 – 4,0 для 5083/1070 и 1,7 – 4,0 для 5083/2024; относительное обжатие 50% – 67%) асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024, позволяющие достичь требуемых значений эквивалентной деформации ($\epsilon > 3$) и угла сдвига ($\phi > 70^\circ$); обеспечивающие

одновременное попадание в границы области гарантированного повышения прочности (σ_b не менее 300 МПа) и технологической пластичности проката (с ростом коэффициента вытяжки до 5,5) (необходимые условия) и прямолинейное движение проката на выходе из очага деформации (достаточные условия).

3. Разработаны новые технические решения (патенты РФ № 2699473, № 2762696, № 2756086 и евразийский патент № 039071), заключающиеся в формировании трапециевидного или зубчатого рельефа для исключения смещения слоёв относительно друг друга в очаге деформации и улучшения прочности соединения, а также задание соотношения скоростей рабочих валков в зависимости от толщин материалов и шероховатости валков при аккумуляющей прокатке.

4. Разработанные технические решения и технологические схемы производства листовых слоистых алюминиевых композитов приняты к использованию в ООО «ЧерметИнформСистемы», Институте информационных технологий, дизайна и производства (г. Джабалпур, Индия). Представленная совокупность технических и технологических разработок внедрена в учебный процесс ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова».

Методология и методы исследования. Разработка технологий производства листовых слоистых алюминиевых композитов основывалась на теории пластичности для описания деформированного состояния металла; теории обработки металлов давлением для расчетов параметров асимметричной аккумуляющей прокатки; теории совместной пластической деформации разнородных металлов (Аркулис Г.Э., Блинов В.С.); теории асимметричного деформирования металлов и сплавов (Выдрин В.Н., Полухин В.П., Салганик В.М., Песин А.М., Пустовойтов Д.О. и др.). Исследование деформированного состояния металла осуществлялось на основе метода конечных элементов с использованием программных комплексов «DEFORM 2D/3D» и «QFORM 2D/3D». Экспериментальное исследование проводилось на промышленно-лабораторном стане асимметричной прокатки 400 Лаборатории механики градиентных наноматериалов имени А.П. Жилиева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова».

На защиту автором выносятся:

1. Необходимые и достаточные условия (попадание в границы областей соотношения суммарной эквивалентной деформации ($\epsilon > 3$) и угла сдвига ($\varphi > 70^\circ$) в совокупности с прямолинейным движением листового слоистого алюминиевого композита) одновременного повышения прочности (σ_B не менее 300 МПа) и технологической пластичности (с ростом коэффициента вытяжки до 5,5) при асимметричной аккумулярующей прокатке листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024;

2. Диапазон отношений скоростей рабочих валков ($V_1/V_2 = 2,5...4$) для процесса асимметричной аккумулярующей прокатки листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024, обеспечивающий максимальные относительное удлинение δ (12%) и отношение временного сопротивления разрыву σ_B к пределу текучести σ_T (1,55), а также прямолинейное движение металла на выходе из очага деформации;

3. Возможности увеличения технологической пластичности с 42% до 77,5% при холодной асимметричной аккумулярующей прокатке со значением отношения скоростей валков 1,9 по сравнению с симметричной деформацией для листового слоистого алюминиевого композита 5083/5083;

4. Закономерности снижения усилия (с 1330 кН до 600 кН) и повышения относительного обжатия (с 37% до 67%) при прокатке листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 в диапазоне увеличения отношения скоростей рабочих валков с 1 до 4;

5. Зависимости распределений слоёв в листовых слоистых алюминиевых композитах 5083/2024 и 5083/1070 по длине очага деформации при обжатии 50% и соотношении скоростей рабочих валков от 1 до 2 при асимметричной аккумулярующей прокатке с определением глубины внедрения слоев (при максимальной глубине внедрения слоя 5083 в композите 5083/2024 – 0,21мкм, а глубина внедрения сплава 1070 в композите 5083/1070 – 0,15мкм).

Достоверность научных положений, выводов и практических рекомендаций подтверждена соответствием результатов моделирования и

экспериментальных данных, которые оценивались количественным воспроизведением в условиях экспериментальной прокатки на стане 400 асимметричной прокатки Лаборатории механики градиентных наноматериалов имени А.П. Жилияева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова».

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на ряде научно-технических конференций: XI Международный конгресс прокатчиков (Магнитогорск, 2017 г.); 27th, 30th International Conferences on Metallurgy and Materials – METAL (г. Брно, Чехия, 2018, 2021 гг.); 6-ая открытая школа-конференция стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы (УМЗНМ)-2018» (г. Уфа, Россия, 2018 г.); 17th International Conference on Metal Forming (Japan, Toyohashi, 2018 г.); Международная конференция Трубы 2018, секция «Молодые ученые и специалисты черной металлургии» (Челябинск, 2018 г.); 3-я, 4-ая, 5-ая и 6-ая Международная молодежная конференция «Magnitogorsk Rolling Practice 2018-2022» (Магнитогорск, 2018-2022 гг., 2019 год – награда за лучшее теоретическое исследование, 2020 год – диплом за 3-е место); YIC2019 – Eccomas Young Investigators Conference (Krakow, Poland, 2019 г.); доклад в Краковском политехническом университете им. Тадеуша Косюшко (Politechnika Krakowska, 2019); XXIV Международная молодёжная научная конференция «Туполевские чтения» (школа молодых ученых) (Казань, 2019 г.); Magnitogorsk Materials week 2021 in memory of prof. Zhilyaev (Магнитогорск, 2021 г.).

В диссертации были использованы результаты, полученные в пяти научно-исследовательских работах:

1) по Мегагранту по Постановлению № 220 Правительства РФ на тему «Механика градиентных, бимодальных и гетерогенных металлических наноматериалов повышенной прочности и пластичности для перспективных конструктивных применений» (№ договора: 14.Z50.31.0043 от 2018 г.);

2) в рамках гранта «Разработка и теоретико-экспериментальное исследование новых методов интенсивной пластической деформации для получения металлических наноструктурированных листов повышенной прочности»

финансированной Российским научным фондом (по соглашению № 15-19-10030-П от 2018 г.);

3) при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта «Исследование закономерностей формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов при асимметричной тонколистовой прокатке в режиме интенсивной пластической деформации» (соглашение № 14-08-31143);

4) по программе совета по грантам Президента Российской Федерации по теме «Разработка научно-технологических основ получения высокопрочных ультрамелкозернистых алюминиевых сплавов со структурами композиционного типа» (по соглашению № 075-02-2018-347 от 2018 г.);

5) при поддержке РФФИ в рамках проекта «Разработка легких наноструктурированных функционально-градиентных материалов для высокопрочных применений с помощью методов гибридной асимметричной прокатки и инкрементальной формовки» (соглашение №22-49-02041 от 2022 г.)

Публикации. Основное содержание работы отражено в 21 печатной работе, в том числе 2 статьях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 статьях, опубликованных в журналах, включенных в перечень ведущих международных рецензируемых научных журналов и изданий Scopus и Web of Science; 10 статьях, включенных в перечень ведущих российских рецензируемых научных журналов, а также 3 патентах РФ и 1 Евразийском патенте..

Граф работы представлен на рисунке 0.1.

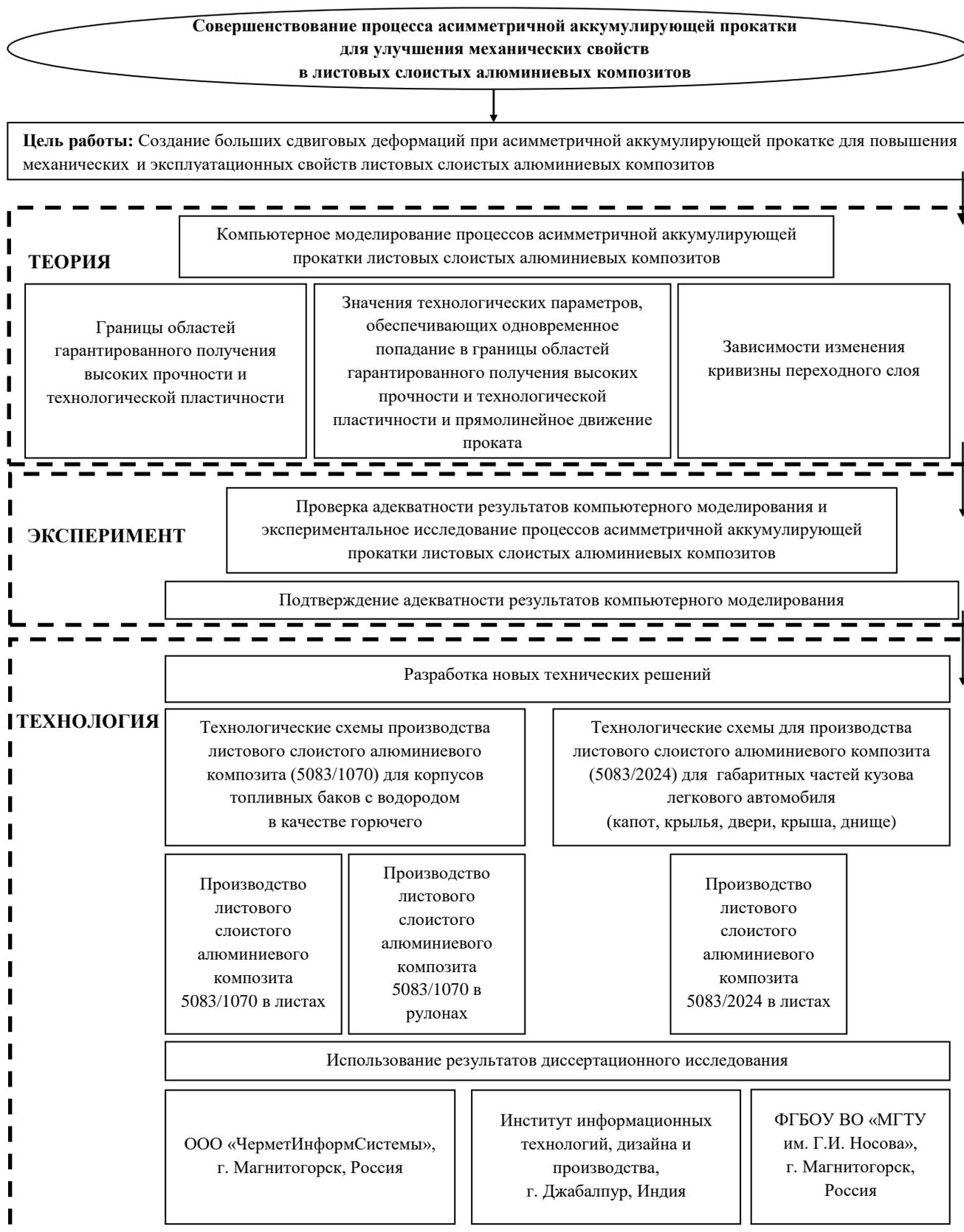


Рисунок 0.1 – Граф работы

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Современное состояние вопроса производства листовых слоистых композитов

На сегодняшний день листовые слоистые композиты набирают популярность при производстве ответственных деталей и конструкций в различных отраслях промышленности: пищевой, нефтеперерабатывающей, электротехнической, машиностроительной, автомобильной и т.д. Чаще всего листовые слоистые композиты получают путем пластической деформации, например, прокаткой (также как ковкой или штамповкой), обеспечивающей соединение за счет механического воздействия, и сваркой взрывом. Кроме того, их можно произвести путем различных видов литья (центробежного, в кокиль и т.д.), сварки (дуговой, плазменной, лазерной и т.д.) и наплавки (газовой, плазменной, лазерной и т.д.). С точки зрения обработки металлов давлением, наибольший интерес представляет получение листовых слоистых композитов путем механической деформации.

Следует отметить, что у истоков работ по производству биметаллов и листовых слоистых композитов стоял Г.А. Григоренко с работой 1932 г. «Биметаллы, их назначение и производство». От школы МГТУ им. Г.И. Носова можно упомянуть пионерскую статью Г.Э. Аркулиса «Закономерности совместной пластической деформации разнородных металлов», опубликованную в 1958 г. Деформация листовых слоистых композитов с особенностями образования переходных слоев и гетерогенной структуры изучалось такими учеными как: Аркулис Г.Э. [25], Бояршинов М.И. [26], Бринза В.Н. [27], Волобуев С.А. [28], Громов Н.П. [29], Гун Г.С. [30], Гуревич Л.М. [31], Долженков Ф.Е. [32], Засуха П.Ф. [33], Кобелев А.Г. [34], Король В.К. [35], Полухин П.И. [36], Проничев Д.В. [37], Стеблянка В.Л. [38], Трыков Ю.П. [39], Шморгун В.Г. [40], Блинов В.С. [41], Yu H. [42], Yi H., Kawasaki M. [43], Langdon T.G. [44], Iwahashi Y. [45], Tieu K. [46], Lu C. [47, 48], Lee Y.G. [49], Lee S. H. [50], Wang J. [51], Choi I.C. [52], Reihanian M. [53, 54], Saito Y. [55], Naseri M. [56],

Alimi N.M. [57], Chen M.C. [58], Jiang L. [59], Tsuji N. [60], Yang M. [61], Fang T.H. [62] и др.

Большое внимание уделено подготовке контактных поверхностей металлов для получения прочного соединения листового слоистого композита. Дело в том, что на поверхности скапливаются различного рода загрязнения и образуются оксидные плёнки. В способы подготовки можно включить такого вида очистки как: механическая (ударно-волновая, с помощью щёток), химическая (обезжиривание в различных растворах), термическая (электродуговая в вакууме, ионно-лучевая) и т.д. Известно, что способ очистки поверхности влияет на образование переходного слоя и прочность соединения металлов, также как величина обжата, температура применяемой термической обработки и механическая неоднородность [63]. Кроме того важно выдержать временной интервал обработки после очистки поверхности – для получения более прочного соединения не должно пройти более 10 минут после очистки из-за скорости образования оксидных пленок [63].

Переходный слой играет немаловажную роль в формировании листовых слоистых композитов: в большей степени качество переходного слоя определяет качество материала в целом. Структура переходного слоя должна оцениваться не так как в основных металлах. Дело в том, что при сварке и диффузионных взаимодействиях переходный слой приобретает особенную структуру, которая будет обладать уникальными свойствами. Такому слою будут присущи как характеристики первого, так и второго металла из которого данный слой образовался. Стоит отметить, что для определения свойств переходного слоя необходимо учитывать сплавы основного металла, то есть химический состав, способ и условия предварительной подготовки металла перед сваркой (брашинг и зачистка), а также взаимодействие валков и прокатываемого металла. Важно, что оценка перечисленных параметров повлияет как на формирование переходного слоя, так и на диффузионные взаимодействия или уровень внедрения металлов друг в друга. В зависимости от видов соединяемых металлов, диффузионные процессы будут протекать активно, или, наоборот, затруднительно. При активных

диффузионных процессах толщина переходного слоя в среднем составляет от 5 до 15 мкм, при увеличении температуры и времени выдержки при термической обработке и величины обжатий, происходит расширение переходной зоны (на 20 % и более) [64]. С увеличением толщины переходной зоны, увеличивается и прочность соединения в листовых слоистых композитах.

Одними из перспективных материалов для производства листовых слоистых композитов являются цветные металлы и сплавы. В последние годы отрасль цветной металлургии в России стала одной из самых важных и конкурентоспособных на рынке. В целом доля металлургии в производственном объеме России занимает около 20 %, важная часть из которых отходит на цветную металлургию. Сейчас в Российской Федерации, в странах Азии, Африки и Европе значительно возрос интерес к развитию областей, в которых применяются сплавы, обладающие определенным набором свойств. Данные сплавы должны, с одной стороны, обладать высокой коррозионной стойкостью, сравнительно высокими прочностью и пластичностью, малой плотностью, а также неплохой технологичностью в металлургическом и машиностроительном производстве, а с другой стороны содержать мало легирующих элементов и быть относительно дешевыми. Такие свойства позволяют использовать их в таких областях как: космос, автомобилестроение, электротехника, строительство и авиация.

Больше всего спрос идет на алюминиевую продукцию, что позволяет алюминиевой промышленности развиваться довольно быстрыми темпами. Очевидный факт, что плотность алюминиевых сплавов в 2,5 раза меньше, чем плотность стали, а масса готовой продукции на 35 – 40 % меньше массы соответствующих стальных деталей. Алюминий в качестве конструкционного материала является основой для производства деталей различных отраслей, в том числе автомобильной (например, в таких марках как: Audi, BMW, Chevrolet, Porsche, Tesla, Jaguar, Ferrari), как представлено на рисунке 1.1 и 1.2, авиационной, космической, что иллюстрирует рисунок 1.3 и 1.4, судостроительной.

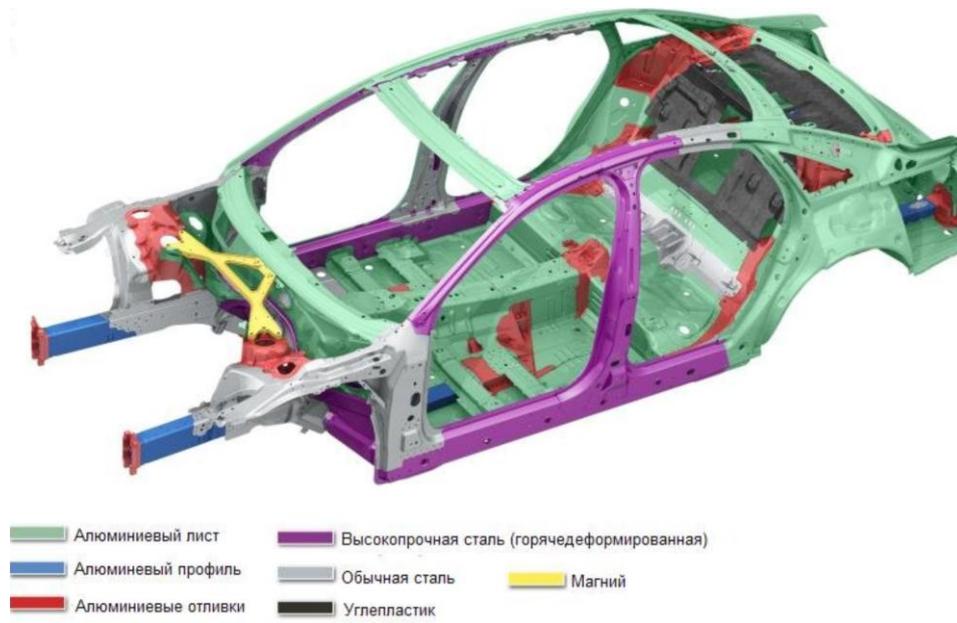


Рисунок 1.1 – Материалы для изготовления кузова современного автомобиля



Рисунок 1.2 – Габаритные части кузова легкового автомобиля

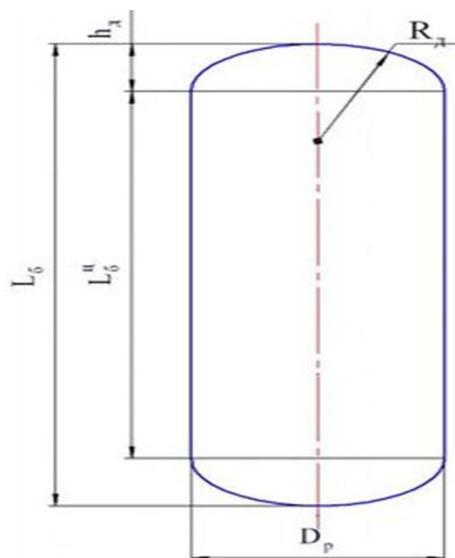


Рисунок 1.3 – Схема бака ракеты носителя



Рисунок 1.4 – Конструкции топливных баков различных ракет носителей (Saturn V, Space Shuttle, Falcon Heavy, Space launch system) [65]

Алюминиевые сплавы подвергаются особой обработке с целью улучшения эксплуатационных свойств, а именно: легированию как основному методу получения высокопрочных деформируемых сплавов, а также некоторым видам термообработки – например отжигу с последующей закалкой. Легируют алюминий, как правило, медью, марганцем, кремнием, магнием и цинком. Исходя из этого все алюминиевые сплавы делятся по сериям: с 1xxx по 8xxx. Одни из самых распространенных серийных алюминиевых сплавов, их российские аналоги и характеристики представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики и маркировка распространённых алюминиевых сплавов

Характеристика сплавов	Маркировка		Система легирования	Примечание
Сплавы упрочняемые давлением (термонеупрочняемые)				
Сплавы низкой прочности и высокой пластичности (свариваемые, коррозионностойкие)	АД0	1070	Технический алюминий	Также АД, А5, А6
	АД1	1230		
	АМц	3003	Al-Mn	Также ММ (3005)
	Д12	3004		
Сплавы средней прочности и высокой пластичности (свариваемые, коррозионностойкие)	АМг2	5251	Al-Mg (магналин)	Также АМг1, АМг2, АМг4 и т.д.
	АМг3	5754		
	АМг4,5	5083		
	АМг5	5056		

Характеристика сплавов	Маркировка		Система легирования	Примечание
Термоупрочняемые сплавы				
Сплавы средней прочности и высокой пластичности (свариваемые)	АД31	6063	Al-Mg-Si (авиали)	Также АВ (6151)
	АД33	6061		
	АД35	6082		
Сплавы нормальной прочности	Д1	2017	Al-Cu-Mg (дюралю)	Также В65, Д19, ВАД1
	Д16М	2024		
	Д18	2117		
Сплавы нормальной прочности (свариваемые)	1915	7005	Al-Zn-Mg	
	1925	-		
Высокопрочные сплавы	В95	7075	Al-Zn-Mg-Cu	Также В93
Жаропрочные сплавы	АК4-1	-	Al-Cu-Mg-Ni-Fe	Также АК4
	1201	2219	Al-Cu-Mn	Также Д20
Ковочные сплавы	АК6	-	Al-Cu-Mg-Si	
	АК8	2014		

Производство новых легких и сверхпрочных металлов для автомобильной, аэрокосмической и других отраслей промышленности с повышенными требованиями прочности является одним из ключевых направлений развития технологического прогресса во всем мире [66 – 74].

Сложность обработки такого рода сплавов заключается в возникновении деформационного разогрева в процессе холодной прокатки. Для определения напряженно-деформированного состояния с учетом деформационного разогрева металла во время пластической деформации, для полноты картины необходимо решить две взаимосвязанные задачи: тепловую и механическую [75].

Для поиска решения первой задачи, то есть теплового условия, необходимо установить ряд параметров, как деформируемого материала, так и инструмента, воздействующего на материал. Основные теплофизические параметры материала: коэффициент теплоемкости, теплопроводности и черноты. У материала инструмента учитываются только коэффициент теплоемкости и теплопроводности. В качестве граничных условий выступали конвективный и

кондуктивный теплообмен, которые являлись регулятором теплообмена между инструментом, окружающей средой и обрабатываемым материалом.

На примере деформации алюминиевого сплава 5083 можно рассмотреть, как осуществляется процесс деформационного разогрева во время симметричной и асимметричной прокатки [76]. Выявлено, что уровень разогрева зависит от скорости прокатки, от материала валков и заготовки, от обжатий. Например, при деформации сплава алюминия 5083 со скоростью $V_1 = 100$ мм/сек разогрев металла в очаге деформации существенен: до 232°C при симметричной прокатке и до 260°C при асимметричной прокатке с обжатием, соответственно, 50 %, что иллюстрируют рисунки 1.5 и 1.6 [24].

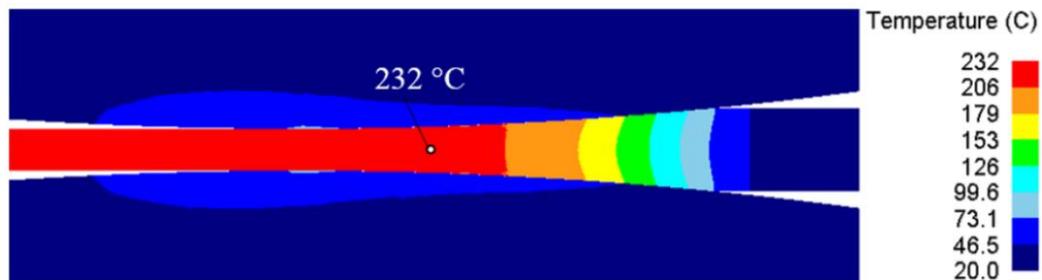


Рисунок 1.5 – Деформационный разогрев при холодной симметричной прокатке алюминиевого сплава 5083 с обжатием $\varepsilon = 50\%$ [24]

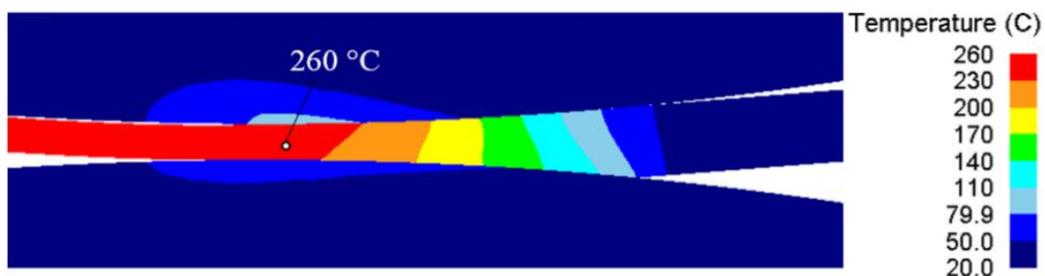


Рисунок 1.6 – Деформационный разогрев при холодной асимметричной прокатке алюминиевого сплава 5083 с обжатием $\varepsilon = 50\%$ [24]

В очаге деформации во время пластического деформирования металла происходит сильный его разогрев [24, 77, 78]. Повышение температуры зависит как от свойств конкретного металла, так и от параметров процесса. Определить термодинамический разогрев можно аналитически исходя из законов термодинамики [79]:

$$\Delta t_p = \frac{\eta T \Lambda}{c \rho}, \quad (1.1)$$

где T – интенсивность касательных напряжений;

Λ – степень деформаций сдвига;

η – доля тепла, остающаяся в теле;

c – удельная теплоемкость;

ρ – плотность.

Известно, что уровень деформационного разогрева имеет большое влияние, как на механические, так и на термические условия обработки материала. В случае обработки алюминиевых сплавов, разогрев, достигающий подобных значений, может привести к перекристаллизации или, даже к плавлению металла в очаге деформации. При дальнейшем охлаждении полосы на воздухе температура металла снижается с 324° С до 24° С за 200 секунд. Вывод очевиден: в процессе пластической деформации в очаге деформации происходит сильный деформационный разогрев металла, который может привести к изменению размера зерен, к перекристаллизации и даже к плавлению. Один из путей решения данной проблемы является ограничение скорости деформирования. Вторым вариантом решения включает в себя использование криогенной обработки перед процессом, которая позволит не только сократить влияние деформационного разогрева на структуру металла, но и дополнительно улучшит свойства алюминиевых сплавов.

1.2 Использование методов интенсивной пластической деформации

Получение требуемых механических, технологических и эксплуатационных свойств в конструкционных материалах играет первостепенную роль при обеспечении долговечности и надежности работы конструкций и агрегатов. С каждым годом требования к конструкционной прочности деталей возрастают. Это обуславливает появление новых технологий при производстве оборудования для авиа- и автомобилестроения, машиностроения, космической отрасли и т.д. Работоспособность конструкций должна увеличиваться постоянно исходя из

требований не только промышленности, но и экономической выгоды. Появляется необходимость использования новых материалов с особым комплексом свойств. Появляется возможность создания новых сплавов, методов корректировки и создания новых технологий по обработке данных сплавов, а также термического воздействия для получения итоговой структуры.

Вместе с тем, в последнее десятилетие быстрыми темпами развиваются новые способы по получению ультрадисперсных структурных состояний в металлах и сплавах в нескольких отраслях науки: в обработке материалов и материаловедении. Данные мероприятия позволят улучшить механические характеристики, например прочность и пластичность, при этом с возможностью сохранения их уровня при термической обработке или при дальнейшей эксплуатации. На основе разработки подобного направления появляется возможность создания нового комплекса механических свойств в материалах. Данное утверждение относится в первую очередь к сплавам, имеющим ультрамелкозернистую структуру.

На сегодняшний день известно, что образование ультрамелкозернистой структуры обуславливается взаимодействием образованных в структуре дефектов материала (например, дислокаций), что существенно влияет на свойства данного материала [80]. Можно сделать вывод о том, что изготовление материалов с ультрадисперсной структурой – это сложная технологическая проблема. Традиционно методами ее решения является использование методов интенсивной пластической деформации [81 – 91].

Неоднократно было продемонстрировано, что различные методы ИПД применяются для производства материалов со значительно улучшенными механическими свойствами, как правило, это улучшенные прочностные характеристики при монотонной и немонотонной нагрузке. Разработка технологий интенсивной пластической деформации, как для производственного применения, так и для коммерческого является сложной научно-технической задачей.

Существующие методы ИПД:

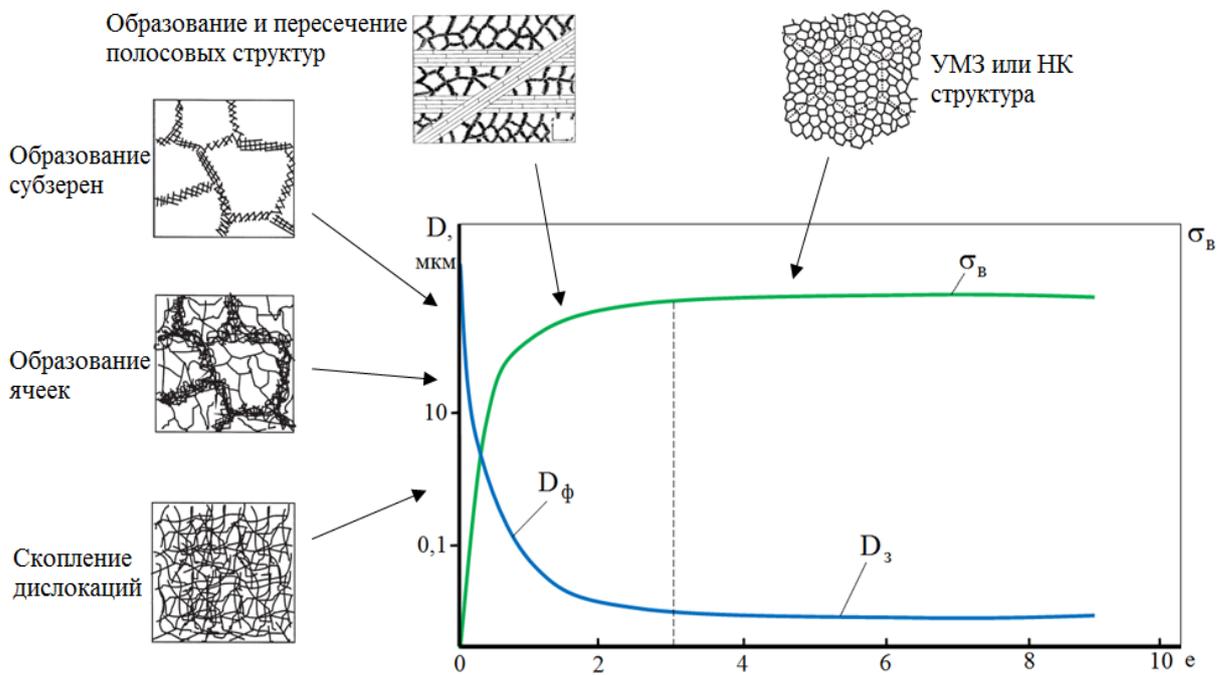
- 1) Кручение под квазигидростатическим давлением.
- 2) Всесторонняя изотермическая ковка.
- 3) Равноканальное угловое прессование.
- 4) РКУП-конформ.
- 5) Комплексное угловое прессование.
- 6) Винтовая экструзия.
- 7) Знакопеременная обработка («рифление – выпрямление»).
- 8) Аккумулирующая прокатка.

Вопросы по использованию методов интенсивной пластической деформации освещены в ряде работ отечественных и зарубежных авторов: Сегала В.М. [92], Щукина В.Я., Валиева Р.З. [93, 94], Чувильдеева В.Н. [95], Юнусовой Н.Ф. [96], Ахмадеева Н.А. [97], Сысоева А.Н. [98], Маркушева М.В. [99], Паршикова Р.А., Рааба Г.И., Нгуена Ч.А., Михайловской А.В.; Yu H. [100], Pedro H.R. Pereira, Yi H., Kawasaki M., Langdon T.G. [101], Iwahashi Y., Farojiet, G. [102], Jamaati R.S. [103], Lu C. [104], Lee S.H. [105], Huang J.Y. [106], Wang J. [107, 108], Nieh T.G., Reihanian M. и др. В их работах определены фундаментальные основы, заключенные в определении способов получения высоких значений прочности с помощью методов интенсивной пластической деформации и механизмов и этапов измельчения структуры при ИПД.

Увеличение прочности за счёт использования ИПД, которое даст возможность уменьшить массу изделий является актуальной задачей с точки зрения перспективных применений алюминиевых сплавов. Обработка алюминиевого сплава методом ИПД дает возможность измельчения структуры металла. Также это ведет к росту плотности дислокаций. Важно отметить, что предел текучести и предел прочности показательно возрастают. Измельченное зерно в подобных условиях является необходимым фактором для того, чтобы сохранялась пластичность металла на должном уровне. Интенсивная пластическая деформация может позволить увеличить интервал температур при котором проявится сверхпластичность. А также высокие обжатия, которые

способствуют увеличению сдвиговой деформации, однозначно ведут к измельчению зерна в структуре [79 – 116].

Главные этапы преобразования структуры при интенсивной пластической деформации имеют явные отличия от стандартных методов обработки металлов давлением. При протекании ИПД после достижения порогового значения деформации, механические свойства показывают свой максимум. Основной причиной данного процесса является характер деформирования с дополнительным влиянием масштабного фактора на структурообразование [24]. Основные стадии эволюции структуры при ИПД показаны на рисунке 1.7.



УМЗ – ультрамелкозернистая структура, НК – нанокристаллическая структура

Рисунок 1.7 – Основные стадии эволюции структуры при ИПД [24]

Данная иллюстрация указывает на то, что благодаря увеличению значения накопленной (эквивалентной) деформации ϵ до 3, прочностные характеристики стабилизируются, при этом материал сильно фрагментируется на разориентированные субзерна.

Однако большинство методов ИПД не позволяют получать длинномерные изделия, что существенно ограничивает использование этих методов в промышленности.

1.3 Описание процессов асимметричного деформирования

1.3.1 Процесс асимметричной прокатки

Для повышения качества металлопродукции необходимо разрабатывать методы обработки материалов, которые не только будут выгодны с экономической точки зрения, но и позволят заметно улучшить механические свойства металлов и сплавов. Асимметричная прокатка в этом случае рассматривается как экономически выгодный, быстроразвивающийся в последние годы процесс. По своей сути асимметричная прокатка – это процесс прокатки, при котором асимметрия создана целенаправленно для получения определенных свойств. Это процесс прокатки, в котором изменены условия протекания процесса в сторону асимметрии: геометрические, физические, кинематические факторы меняются исходя из требований технологии.

Ранее уже было упомянуто, что симметричный процесс является выражением эталона прокатного процесса. Однако при этом существует несколько способов по целенаправленному созданию асимметрии: изменение скорости одного из валков (кинематическая асимметрия), диаметра (геометрическая асимметрия), использование холостого хода одного из валков, использование бандажа или изменение рельефа поверхности валков и т.д. При этом часть факторов, влияющих как на качество продукции, так и на стойкость оборудования изменится. В первую очередь это касается геометрических особенностей: разнотолщинность полосы значительно уменьшится, снизится количество дефектов связанных с плоскостностью обрабатываемого металла. С точки зрения использования оборудования заметно будет снижение энергозатрат в процессе прокатки, также как и уменьшение усилия прокатки. При верно подобранных входных параметрах процесса асимметричной прокатки решится проблема загиба переднего конца металла при выходе из очага деформации.

Развитием данной теории занимались такие исследователи как: Выдрин В.Н. [117], Бровман М.Я. [118], Гришков А.Н., Королев А.А. [119], Полухин В.П. [120, 121], Сеницин В.Г., Химич Г.Л. [122], и др., входящие в

челябинскую школу прокатки; Потапкин В.Ф. [123], Доброносков Ю.К. [124], Морозов И.А., Сатонин А.В. [125, 126], представляющие краматорскую школу прокатки; Скороходков В.Н. [127, 128], Трайно А.И., Ефремов Н.И. [129], Пименов А.Ф. [130], входящие в состав московской школы прокатки. А также зарубежные авторы: Chao Q., Cheon B. H. [131], Dyja H., Markowski J. [132], Herman G., Huang Y., Jiang J. [133], Kraner J., Lin N., Liu X. [134], Nilsson A., Pan D., Yu H.L. [135], Zhang T. [136], Zuo F.Q. и др.

Данная работа является развитием традиций школы асимметричного деформирования ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» под руководством Салганика В.М. [137], Песина А.М. [24, 138 – 147], Чикишева Д.Н. [148] и Пустовойтова Д.О. [24, 138 – 147]. Особенность работы данной школы заключалась в разработке трехэтапной математической модели асимметричной прокатки (первый этап состоял в нахождении геометрических и статических условий, второй этап рассматривал кинематику процесса, а третий отвечал за построение КЭМ НДС металла в очаге деформации при обработке).

Доказано, что при асимметричной прокатке в металле одновременно возникают высокие деформации сжатия и сдвига за счет противоположно направленных сил контактного трения, действующих на лист одновременно со стороны верхнего и нижнего валков, вращающихся с различными окружными скоростями. Сдвиговые деформации при этом характеризуются тангенсом макроскопического угла наклона слоев металла в вертикальной плоскости. Таким образом, реализация высоких сдвиговых деформаций является определяющим фактором при разработке процесса асимметричной прокатки для получения ультрамелкозернистой структуры.

При этом сдвиговая составляющая оказывает значительное влияние на величину истинной деформации. На рисунке 1.8 показано, как квадрат элементарной ячейки преобразуется в ромб при неизменном объеме тела во время асимметричной прокатки. При этом изначально прямой угол уменьшается на величину угла сдвига φ .



Рисунок 1.8 – Элементарная ячейка до и после асимметричной прокатки

Основное отличие этого метода от стандартных способов обработки металлов давлением заключается в образовании нескольких мод деформации: сдвига, необходимого для изменения формы металла и его структуры, а также пластического поворота, который имеет влияние в основном только на структуру обрабатываемого сплава (чистый и простой сдвиг) [149]. В данном случае появляются высокоугловые границы зерен, которые образуются из-за пластических поворотов при обработке. В связи с этим в структуре появляются углы поворота и изгиба, которые на кристаллографических плоскостях становятся необратимыми. В данном случае поворотная деформация образует угловые разориентировки, что в дальнейшем отражается на структуре металла [149]. Если сравнивать данный процесс с монотонной деформацией, то угловые разориентировки, также как и крупные структурные изменения наблюдаться не будут.

Пластическая деформация обуславливает основную разницу при формировании структуры при интенсивной пластической деформации и при стандартных способах обработки металлов давлением [149, 150]. Для рассмотрения отличий в чистом и простом сдвиге можно взять элементарную ячейку ABCD, которая при чистом сдвиге трансформируется в прямоугольник A'B'C'D', как показано на рисунке 1.9. Чистый сдвиг при этом характеризуется углом сдвига ϕ , который связан с трансформацией квадрата ABCD в ромб A'B'C'D'. Пример чистого сдвига – процесс листовой прокатки. При простом сдвиге происходит смещение всех точек тела параллельно одной оси. При этом квадрат ABCD превращается в параллелограмм A'B'C'D', основание и высота которого такие же, как и у исходного квадрата, как показано на рисунке 1.10.

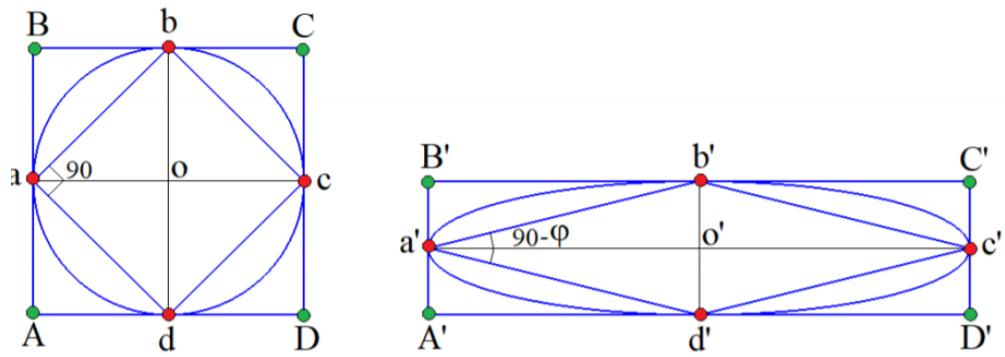


Рисунок 1.9 – Схема чистого сдвига

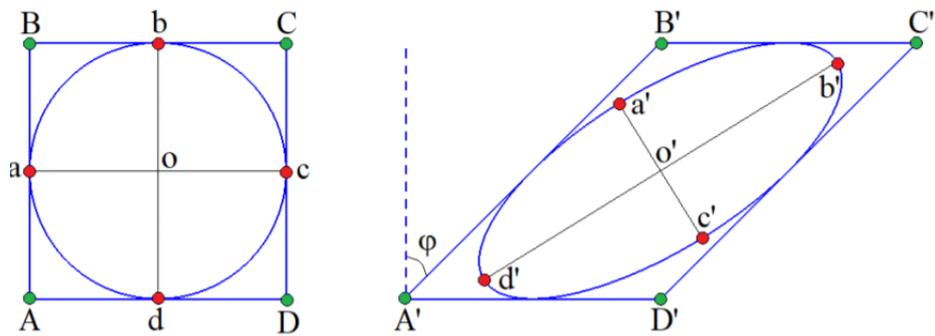


Рисунок 1.10 – Схема простого сдвига

Благодаря разработке новых технологических решений, связанных с применением асимметрии при процессе прокатки с использованием кинематической и геометрической асимметрии [151 – 153] стало возможным получить совмещенное влияние простого и чистого сдвига, то есть осуществление больших деформаций сжатия и сдвига. При данных параметрах квадрат ABCD трансформируется в параллелограмм A'B'C'D', основание которого вытягивается, а высота укорачивается, как показано на рисунке 1.11. В этом случае можно наблюдать поворот осей и немонотонность деформации. Сдвиговая деформация также характеризуется углом сдвига φ .

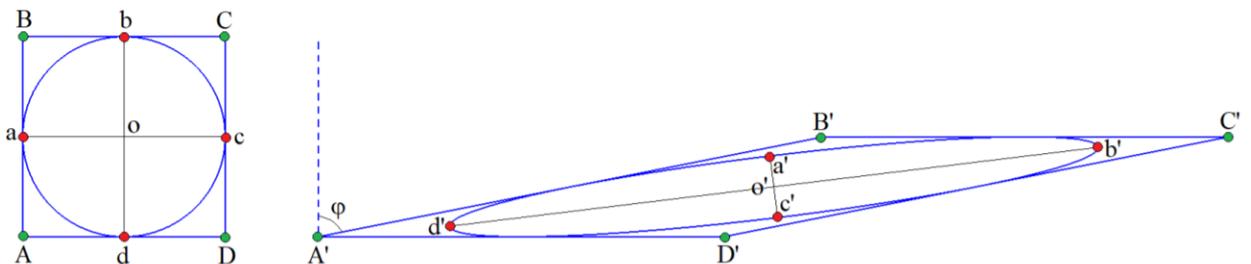


Рисунок 1.11 – Схема совмещенного простого и чистого сдвига

Данная схема реализуется при асимметричной тонколистовой, аккумулирующей, криогенной прокатке. Существует предположение, что данная схема будет несколько эффективней при получении ультрамелкозернистой и наноструктуры, чем схема простого сдвига, присущая большинству методов интенсивной пластической деформации.

С учетом вышесказанного, компоненты деформации ε_y и γ_{xy} можно рассчитать [24]:

$$\varepsilon_y = \ln \frac{AB}{A'B' \cos \varphi}, \quad \gamma_{xy} = \operatorname{tg} \varphi \quad (1.2)$$

Если принять, что $AB = h_0$ и $A'B' \cos \varphi = h_1$, то окончательно формулу нахождения эквивалентной деформации запишем в следующем виде [24]:

$$e = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\ln \frac{h_0}{h_1} \right)^2 + \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{4}} \quad (1.3)$$

где h_0, h_1 – толщина листа соответственно до и после асимметричной прокатки;
 φ – угол сдвига слоев металла.

В работе [24, 154, 155] показана взаимосвязь угла сдвига φ и эквивалентной деформации, а также область реализации процесса асимметричной тонколистовой прокатки в режиме ИПД, что иллюстрирует на рисунок 1.12.

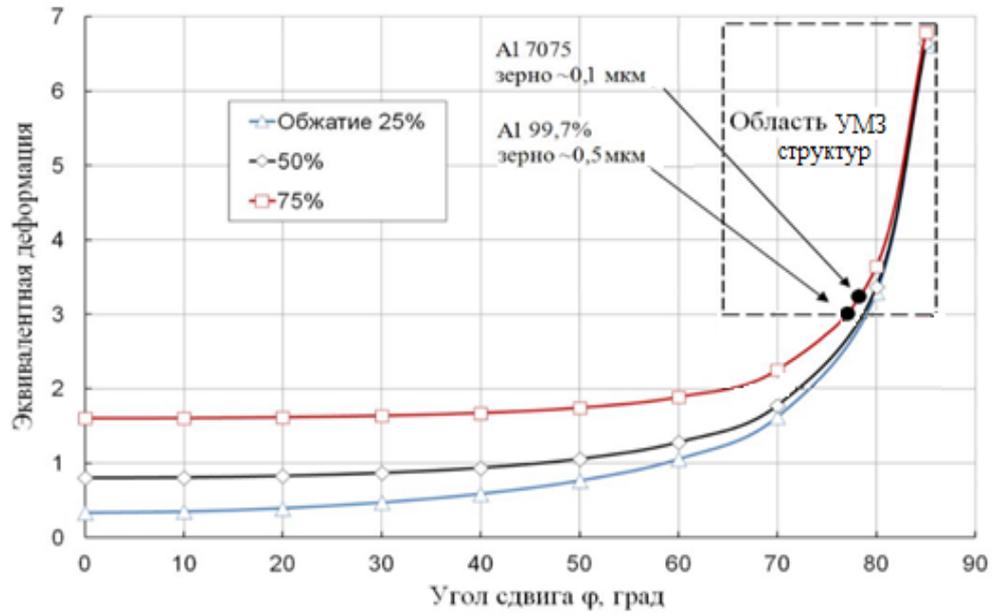


Рисунок 1.12 – Взаимосвязь эквивалентной деформации и угла сдвига при асимметричной тонколистовой прокатке [24, 154, 155]

Моделирование эволюции плотности дислокаций осуществляли на основе решения дифференциального уравнения дислокационной кинетики [156, 157]:

$$\frac{d\rho}{d\gamma} = \left(\frac{\beta}{bD} + \frac{1}{b\lambda_m} + k_f \rho^{1/2} \right) - \left(k_a \rho + \frac{\rho}{\dot{\gamma} t_d} \right), \quad (1.4)$$

где β – коэффициент;

b – вектор Бюргерса;

D – средний размер зерна;

λ_m – расстояние свободного пробега дислокаций;

k_f – коэффициент, определяющий интенсивность размножения дислокаций на дислокациях леса;

k_a – коэффициент аннигиляции винтовых дислокаций;

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвиговой деформации;

t_d – характерное время аннигиляции.

Данное уравнение учитывает:

1) влияние границ зерен на накопление дислокаций (первое слагаемое в правой части);

2) скорость накопления дислокаций за счет их размножения посредством механизма двойного поперечного скольжения винтовых дислокаций на препятствиях недеформационного (второе слагаемое) и деформационного (третье слагаемое) происхождения;

3) скорость аннигиляции винтовых участков дислокационных петель (четвертое слагаемое) и скорость аннигиляции решеточных дислокаций в границах зерен (пятое слагаемое) [156, 157].

Ранее было определено [158], что асимметричная прокатка позволяет при больших показателях деформаций сдвига и сжатия получить воздействие на прокатываемый металл с двух сторон от валков, которым можно придать кинематическую асимметрию.

Кинематическая асимметрия, созданная путем рассогласования окружных скоростей валков, существенно меняет кинематику очага деформации по сравнению с симметричным случаем прокатки. При увеличении степени рассогласования скоростей валков относительная длина зоны опережения на контакте с верхним валком, вращающимся с меньшей скоростью, возрастает. Зона опережения увеличивается, пока степень рассогласования $\Delta V/V_6$ не становится равной степени деформации ε , но не превышает $\approx 80\%$ от длины очага деформации даже при прокатке с высоким коэффициентом трения $f = 0,4$ [159].

В то же время относительная длина зоны опережения на контакте с нижним валком, который вращается с большей скоростью, уменьшается. Уменьшение зоны опережения происходит до тех пор, пока степень рассогласования $\Delta V/V_6$ не становится равной степени деформации ε . При степени рассогласования скоростей равной степени деформации на всей длине очага деформации реализуется зона отставания, и дальнейшее увеличение степени рассогласования скоростей не приводит к изменению протяженности кинематических зон.

Таким образом, реализация высоких сдвиговых деформаций является определяющим фактором при разработке процесса асимметричной прокатки.

1.3.2 Характеристика и использование аккумулярующей прокатки

Аккумулярующая прокатка представляет собой большой интерес в качестве одного из методов интенсивной пластической деформации. С помощью него при нужном количестве циклов возможно получить ультрамелкозернистую структуру благодаря аккумуляции напряжений после каждого цикла обработки. Большой плюс процесса состоит в том, что можно использовать разнородные материалы в качестве исходных заготовок и получать свойства присущие как первому, так и второму сплаву. Все недостатки процесса аккумулярующей прокатки можно решить путем грамотного подбора режима обработки.

Технология аккумулярующей прокатки состоит в многократном повторении цикла обработки поверхности металла – укладки одинаковых по форме и размеру листов друг на друга – соединении этих листов (как правило, сваркой взрывом) – прокатки – резки на равные части – укладки – и т.д. [160]

Кроме стандартной технологии аккумулярующей прокатки возможно использовать вариант с дополнительным поворотом листа при втором и последующим циклах. В ряде работ [161, 162] подобное технологическое преобразование позволяет получить более высокие механические свойства (прочность возрастает на 10%) по сравнению со стандартной технологией.

Тогда технология с применением поперечного поворота плоскости будет выглядеть следующим образом: соединение металлов заклепками или проволокой с предварительной зачисткой и обезжириванием – совместный отжиг полученного пакета – прокатка – порезка – поворот в поперечном направлении на 90 градусов после последующих циклов – соединение – прокатка и т.д. Примеры описанных технологических решений представлены на рисунке 1.13. Недостатком данного способа является требование по предварительному соединению листов, например заклепками. В то же время известны процессы получения слоистых материалов сваркой прокаткой, в которых не требуется предварительного соединения листов [163].

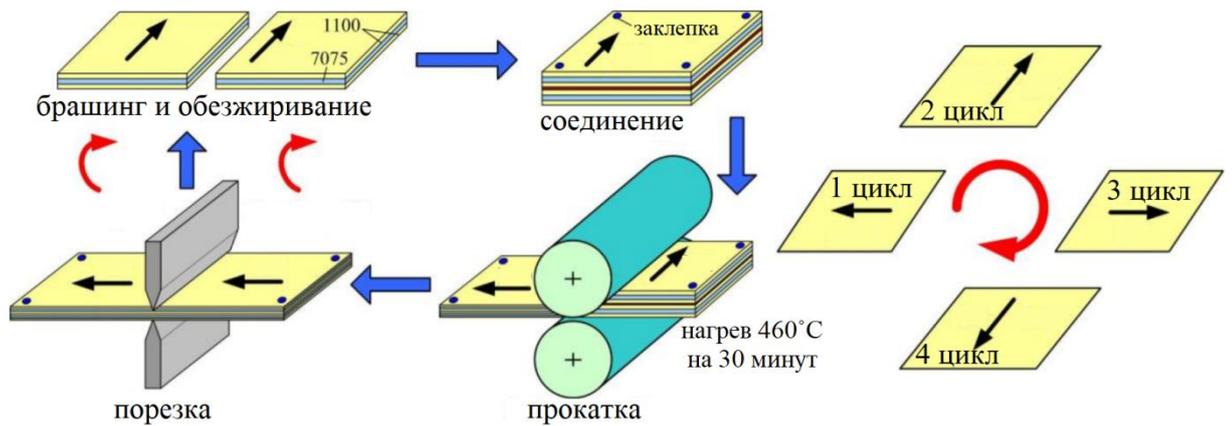


Рисунок 1.13 – Технологическая цепочка аккумулярующей прокатки с изменением ее направления [161]

Фактически это очень эффективные методы для улучшения структуры и механических свойств металлопродукции. Основным преимуществом выступает возможность производства длиномерной продукции, а также невысокая стоимость по сравнению с методами ВИК и РКУП.

Развитием процесса аккумулярующей прокатки занимались такие ученые как: Beausir В. [164], Kamikawa N. [165], Lee T.O. [166], Sato Y.S. [167], Liu R.P. [168], Yu H. [169], Kim Y.S. [170] и др.

Выявлено, что процесс аккумулярующей прокатки может использоваться, например, как для увеличения прочности алюминия, так и для производства новых многослойных материалов путем объединения алюминия с другими прочными материалами, чтобы получить композиты с улучшенными свойствами и структурой. При этом сохраняется начальная толщина листа и отсутствуют геометрические изменения формы, что служит еще одним преимуществом процесса.

При изготовлении металла методом аккумулярующей прокатки важно соблюдать технологию сварки металлов, так как при сильно упрочненных слоях прочность сцепления двух разнородных металлов может быть мала. Это может привести к образованию большого количества трещин во время процесса прокатки. Для образования более прочного соединения возможно использовать процесс теплой прокатки, либо предварительно обрабатывать соединяемые материалы, в случае если по технологии металлы свариваются давлением.

Возникновение дефекта «крокодил», как показано на рисунке 1.14, при обработке алюминиевых сплавов с различной прочностью было найдено в работе [171]. Также в описании данного дефекта указано, что частой причиной возникновения является неверно подобранные обжатия и температурный режим прокатки.



Рисунок 1.14 – Дефект «крокодил» [171]

Кроме того обработка материалов путём аккумулялирующей прокатки имеет некоторые ограничения. Материалы, подвергающиеся большим обжатиям, имеют меньшую пластичность, и, как следствие, возникает необходимость применять тепловую обработку по завершению процесса. Трудности также возникают при получении оптимальной шероховатости поверхности материала, на котором образуются поперечные трещины и поры. Помимо всего, излишняя сдвиговая деформация приводит к большой неоднородности полосы. Термообработка при данном процессе зачастую становится неотъемлемой частью технологического процесса. В процессе прокатки может произойти процесс перерекристаллизации и сильный термодинамический разогрев в очаге деформации, что несет за собой изменение структуры материала. В данном случае возможно использование отжига перед процессом прокатки или же криогенную обработку до ее начала. Кроме того, возможно проводить процесс теплой или горячей прокатки с нагревом алюминиевых сплавов средней и нормальной прочности до 420°C в течении 15 – 60 минут.

Результат образования дефектов также рассматривается в работе [172]. Пример типичного дефекта листа сплава 5й серии (5251) показан на рисунке 1.15.

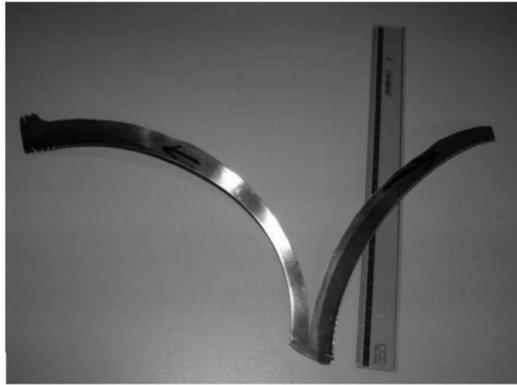


Рисунок 1.15 – Типичный дефект продукции из алюминиевых сплавов в виде продольного разрыва полученного при обработке методом аккумулялирующей прокатки [172]

Из исследования [172] видно, что скорость прокатки была не более 10 об/мин, диаметр валков – 150 мм, толщина образцов – 1 мм, обжатие – 50 %. Предварительно был проведен рекристаллизационный отжиг при 400° С с выдержкой в 1 час. Затем, в течение обработки образцы подвергались повторному нагреву до 200° С после 2го, 6го и 9го циклов прокатки.

Исследования [173 – 177] также показывают возможности аккумулялирующей прокатки, которые в том числе учитывают использование термической обработки металлов после деформации. В данных случаях показано, что при увеличении количества циклов при аккумулялирующей прокатке, поверхность излома металлов становится более гладкой, микропустоты уменьшаются под действием сдвиговых напряжений [173].

Рассматриваются также возможности применения различного рода термической обработки в совокупности с деформированием методом аккумулялирующей прокатки. В работах [174] описываются условия получения структуры алюминиевого материала различных серий с применением криогенной обработки до достижения температуры -190° С. Показана возможность получения суперпластичности [174 – 177], что подтверждают фотографии микроструктур, представленных на рисунке 1.16.

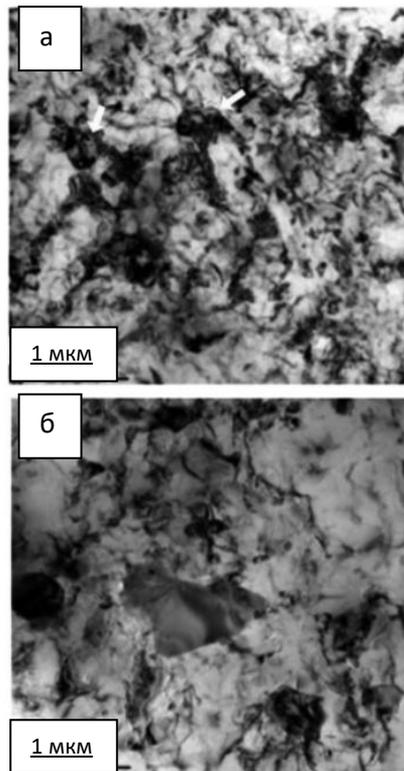


Рисунок 1.16 – Микроструктура алюминиевого слоистого композита 1050/5052 после 5^{го} цикла аккумулярующей прокатки, ультрамелкозернистая структура (а – сторона 1050, б – сторона 5052) [177]

Для получения большего эффекта можно использовать совмещенный процесс асимметричной и аккумулярующей прокатки. Синергетический эффект подразумевает под собой повышение эффективности мероприятий за счет слияния двух процессов в один, что можно наблюдать в процессе асимметричной аккумулярующей прокатки. Это позволит получить новые технические решения в области разработки технологий обработки металлов и сплавов для получения высоких значений механических свойств.

Асимметричная аккумулярующая прокатка является специальным видом, благодаря которому возможно получать длинномерную металлопродукцию с высокими значениями механических свойств. Важно отметить, что при получении слоистой заготовки большую роль играет образование качественного шва, как было указано ранее. Известно, что в результате аккумулярующей прокатки листы между собой соединяются за счет диффузионных взаимодействий, которые вызывают впоследствии измельчение микроструктуры обрабатываемого металла.

Место соединения металлов будет образовывать переходный или интерметаллидный слой, структура которого должна оцениваться не так как в основных металлах. Дело в том, что при сварке и диффузионных взаимодействиях данный слой приобретает особенную структуру, которая будет обладать уникальными свойствами. Такому слою будут присущи как характеристики первого, так и второго металла из которого данный слой образовался. Стоит отметить, что для определения свойств переходного слоя необходимо учитывать сплавы основного металла, то есть химический состав, способ и условия предварительной подготовки металла перед сваркой (например, зачистка, которая может применяться как к разнородным, так и однородным сплавам, в т.ч. и к алюминиевым сплавам, и может осуществляться с помощью проволочных щёток как показано на рисунке 1.17 или абразивным материалов), а также взаимодействие валков и прокатываемого металла.

Важно, что оценка перечисленных параметров повлияет как на формирование переходного слоя, так и на диффузионные взаимодействия или уровень внедрения металлов друг в друга.

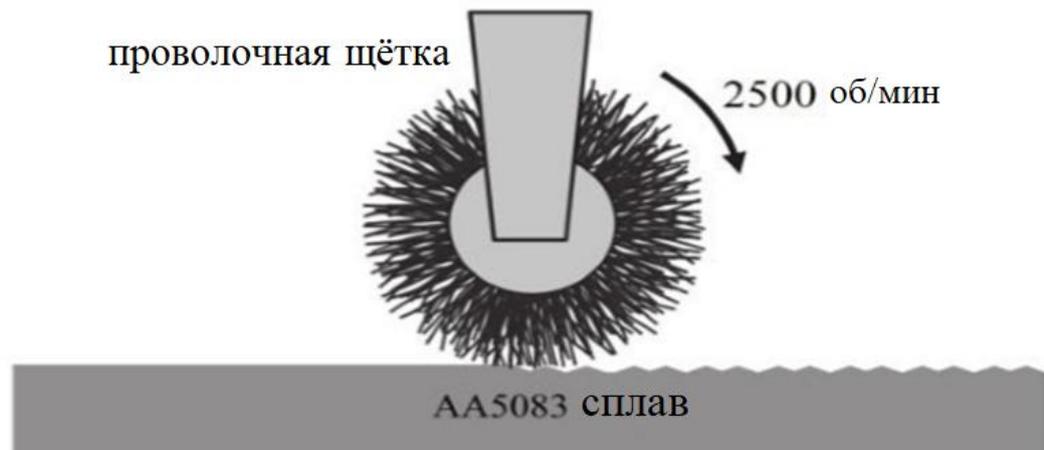


Рисунок 1.17 – Схематичное изображение процесса зачистки поверхности алюминиевого сплава щётками

Образование переходного слоя с точки зрения протекания кинетики процесса изучались не очень широко, наиболее популярны работы таких ученых как: Гуревич С.М. [178], Лысак В.И. [179], Рябов В.Р. [180], Рабкин Д.М. [181], Ершов А.А. [182], Alizadeh M. [183], Tylecote R.F. [184], Jamaati R. [185],

Bagherpour E. [186, 187], Ghalandari L. [188], Talebian M. [189], Dehsorkhi R.N. [190] и др. Результаты исследований показывают, что при образовании переходного слоя, постепенно уменьшается количество зерен основного металла, а также меняется размер зерен в структуре. С увеличением цикла при аккумулярующей прокатке, микроструктура слоистого композита постепенно переходит к виду гетерогенной с множеством диффузионных преобразований со снижением межслойного разделения. При этом прочность межфазного соединения увеличивается, а пластичность постепенно снижается. Граница между слоями может оставаться прямой и плотной вплоть до трех циклов. При наличии интерметаллидов, после четырех циклов сужение начинается в различных местах микроструктуры, и границы раздела фаз становятся волнистыми. После пяти циклов может наблюдаться значительное сужение слоев, в результате чего в микроструктуре образуются линзовидные фрагменты. При образовании плотного интерметаллида в переходном слое возникает вероятность образования микротрещин на границах раздела.

Важную роль играет межслойное трение, образующееся в процессе прокатки. Очевидно, что деформация при обработке слоистых композитов распределяется неравномерно. Происходит это из-за разности свойств обрабатываемых металлов, из которых состоит слоистый материал. Межслойное трение при обработке играет роль до тех пор, пока не произойдет образование прочного соединения металлов в композите. При этом как внешнее, так и межслойное трения определяют величину разнотолщинности металлов и распределения слоев относительно друг друга.

1.4 Постановка цели и задач работы

Целью исследования является повышение механических и эксплуатационных свойств листовых слоистых алюминиевых композитов за счет создания больших сдвиговых деформаций при асимметричной аккумулярующей прокатке.

Представленную цель необходимо реализовать благодаря решению комплекса поставленных задач:

1. Разработка компьютерных моделей в программных комплексах «DEFORM 2D/3D» и «QFORM 2D/3D» и численное исследование влияния различных параметров асимметричной аккумулярующей прокатки на напряженно-деформированное состояние листовых слоистых алюминиевых композитов (5083/1070, 5083/2024, 6061/1070, 6061/2024), силовые параметры процессов, а также характер движения металла на выходе из очага деформации;

2. Определение в результате численного исследования условий получения высоких значений сдвиговой деформации в листовых слоистых алюминиевых композитах;

3. Проверка адекватности результатов компьютерного моделирования и экспериментальное исследование влияния параметров асимметричной аккумулярующей прокатки на механические свойства листовых слоистых алюминиевых композитов;

4. Разработка рациональных технологических схем и режимов асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов для их использования в космической и автомобильной отраслях.

ГЛАВА 2 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ АСИММЕТРИЧНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

2.1 Постановка задачи для численного исследования асимметричной аккумулярующей прокатки как способа обработки листовых слоистых алюминиевых композитов

Целью второй главы диссертации является постановка задачи и численного исследования влияния различных параметров асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов на напряжённо-деформированное состояние металла.

Как следует из первой главы, для получения требуемых механических свойств алюминиевых листов необходимо достичь эквивалентной деформации $\epsilon \geq 3$ и угол сдвига $\varphi \geq 70^\circ$. Для получения высоких значений прочности и технологической пластичности в листовом слоистом алюминиевом материале такие значения эквивалентной деформации ($\epsilon > 3$) и угла сдвига ($\varphi > 70^\circ$) должны быть как в каждом отдельном, так и в переходном слое. Кроме того, параметры должны соответствовать критериям снижения изгиба полосы при обработке.

Компьютерное моделирование [191, 192] осуществляли с помощью программных комплексов «Deform» и «QForm». Эти комплексы были выбраны из целого ряда возможных («Deform», «QForm», «ANSYS», «ABAQUS», «Ls-Dyna», «Catia», «Simufact.Forming», «Delmia») в связи с тем, что они являются специализированными инженерными программными комплексами, предназначенными исключительно для анализа процессов обработки металлов давлением, кроме того в МГТУ им.Г.И. Носова имеются лицензии на данные программные продукты.

Расчет в «Deform» ведется на основе поля скоростей. Цель расчета заключается в том, чтобы определить функции формоизменения и смещения конечных элементов при помощи подбора поля скоростей, которое бы

удовлетворяло условиям сплошности заготовки. Таким образом, сам расчет состоит в определении величины и направления компонентов вектора скорости в узловых точках и в определении на основе этого компонентов вектора скорости смещения и формоизменения граней элементов.

Вначале каждого шага расчета для всех узлов записывается энергетическое уравнение. Для первого шага расчета виртуальное поле создается на основе граничных условий контакта с объектом моделирования. Для последующих шагов значения берутся из предыдущего шага. Далее на основе этих значений находятся поля координат узлов сетки и поля граничных условий. После этого уравнения, найденные для элементов сетки, объединяются в матрицу уравнений и производится расчет значений параметром для каждого узла сетки конечных элементов. Полученные данные проверяются на допустимость. Максимальная величина изменения значений параметров в узлах сетки конечных элементов не должна превышать определенного значения по отношению к начальным данным соответствующих узлов для этого шага. В случае если полученные данные не удовлетворяют этим условиям, то происходит коррекция исходных значений и цикл повторяется заново, начиная с расчета координат узлов.

Температурная задача решалась в программном комплексе «QForm», который является разработкой российских учёных и широко распространён как на российских, так и на зарубежных предприятиях. Данная программа специализируется на процессах ОМД, в том числе широко используется для моделирования специальных методов обработки (например, ИПД), в т.ч. прокатки алюминиевых сплавов при различных температурах. Процесс моделирования в «QForm» превосходит подобные процессы других программных модулей по параметру времени расчета, что стало возможным благодаря новым расчётным алгоритмам. Возможности программы позволяют рассматривать термические условия обработки большого количества металлов и сплавов (алюминиевых, титановых, сталей и т.д.), определять механические характеристики во время и после процесса прокатки (прочность, твёрдость и т.д.), моделировать как

технологические условия процесса термообработки – деформации, так и изменения фазового состава в процессе деформации и т.д.

Дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности, используемое для моделирования, имеет вид [193]:

$$\rho c = k\Delta T + q, \quad (2.3)$$

где ρ – плотность;

c – удельная теплоемкость;

k – коэффициент теплопроводности;

Δ – оператор Лапласа;

T – температура;

q – интенсивность внутренних тепловых источников.

Тепловыделение от пластической деформации q высчитывается следующим образом [193]:

$$q = \eta \dot{\epsilon} \sigma, \quad (2.4)$$

где η – коэффициент перехода энергии пластических деформаций в тепло;

$\dot{\epsilon}$ – интенсивность скоростей пластических деформаций;

σ – напряжение текучести.

При расчете температурных полей в QForm применяется метод конечных объемов, который основывается на законе теплового баланса в каждом конечном объеме [193].

Параметры определялись для обработки:

1) листовых слоистых композитов 5083/1070, 6061/1070 для изготовления баков ракет-носителей и космических кораблей, пригодных для использования водородного топлива. В качестве внутреннего слоя был выбран сплав алюминия 1070, который практически не взаимодействует с водородом. Исследовалась возможность использования сплавов 5083 и 6061, которые обеспечат как прочное соединение со слоем 1070, так и всей конструкции;

2) листовых слоистых композитов 5083/2024, 6061/2024 для изготовления габаритных частей кузова автомобиля (капота, крыльев, крыши, дверей, днища). По сравнению с используемыми на сегодняшний день алюминиевыми сплавами (6016, 6111) предлагаемые листовые слоистые алюминиевые композиты существенно дешевле, кроме того при обработке методом аккумулярующей прокатки значения прочностных характеристик листовых слоистых алюминиевых композитов близки к значениям прочностных характеристик низкоуглеродистых сталей (08ю, 006/IF). Сплав 2024 высокопрочный, показывает низкий эффект старения, легко поддается вторичной переработке. При обработке сплавов 5083 и 6061 возможно получить высокое качество поверхности, кроме того данные сплавы дополнительно упрочняются при сушке лакокрасочного покрытия (особенно сплав 5083).

В обоих случаях необходимо определить рациональность использования алюминиевых сплавов 5083 и 6061 в качестве второго слоя листового слоистого алюминиевого композита.

2.1.1 Граничные и начальные условия для процесса компьютерного моделирования асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов

В настоящее время всё чаще производят листовые слоистые композиты, каждый слой из которых представляет собой различные алюминиевые сплавы [194, 195]. При этом чаще всего используются сплавы первой, второй, пятой и шестой серии [196 – 201]. Химический состав исследуемых марок алюминиевых сплавов представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав алюминиевых сплавов различных серий

Сплав	Mn	Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Ti	Zn	Al
1070	0,03	0,02	0,15	0,16	0,01	-	0,01	0,04	99,70
2024	0,019	0,473	0,422	0,178	0,02	0,001	0,15	0,25	98,487
5083	0,682	4,479	0,091	0,285	0,027	0,104	0,007	0,014	94,282
6061	0,90	1,00	0,60	0,70	0,32	0,22	0,15	0,25	95,86

Сплав 1070 является практически чистым алюминием. Сплав 2024 – легирован медью, один из основных сплавов в авиастроении. Сплав 5083 имеет в

своем составе магний как основной легирующий компонент, обладает высокой коррозионной стойкостью, широко применяется в судостроении. Сплав 6061 помимо магния легирован кремнием, очень часто можно встретить в автомобилестроении.

При исследовании процесса асимметричной аккумуляющей прокатки с применением кинематической асимметрии рассматривались: влияние скоростной асимметрии на деформированное состояние в листовых слоистых алюминиевых композитах, проводился анализ возможностей асимметричной прокатки для снижения изгиба полосы при обработке алюминиевых сплавов, а также энергосиловых параметров процесса асимметричной аккумуляющей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов [202 – 213].

Условия моделирования изотермические, поэтому асимметричная прокатка проводилась при низкой скорости деформирования (менее 5 мм/с). Трение было описано согласно закону Кулона (2.1) с ограничением (2.2):

$$\tau = fp, \text{ при } fp < k \quad (2.1),$$

$$\tau = k, \text{ при } fp \geq k \quad (2.2),$$

где τ – касательное напряжение трения;

f – коэффициент трения;

p – контактное нормальное напряжение;

k – предел текучести на сдвиг.

Вначале в программном продукте «Deform 2D» задача решалась без учета влияния температуры, процесс прокатки холодный. Затем в программном комплексе «QForm» задача решалась с учетом влияния температуры, при этом начальная температура заготовки составила 250° С, соответственно процесс прокатки тёплый.

Исходные данные для моделирования процесса в «Deform 2D»:

1) начальная толщина заготовок h_0 принималась 2,0 мм; 3,0 мм; 4,0 мм;

- 2) температура деформируемого металла 20°C ;
- 3) радиусы верхнего и нижнего рабочих валков R совпадали и принимались равными 170 мм, а также 250 мм;
- 4) коэффициент трения $f = 0,1 \dots 0,4$;
- 5) степень деформации (обжатие) ε от 50 % до 60 %;
- 6) композиты были составлены из сплавов алюминия 5083/2024, 5083/1070, 6061/2024, 6061/1070;
- 7) окружная скорость верхнего валка V_1 составила 10 об/мин, в то время как окружную скорость нижнего валка V_2 принимали равной скорости верхнего валка (в симметричном случае) и снижали в 1,1 – 4 раза относительно окружной скорости верхнего валка для создания кинематической асимметрии процесса;
- 8) соединение слоев образовано функцией «склеивание»;
- 9) трение между слоями металла отсутствовало.

Конечно-элементная модель на примере листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 из программного комплекса «DEFORM 2D/3D» представлена на рисунке 2.1.

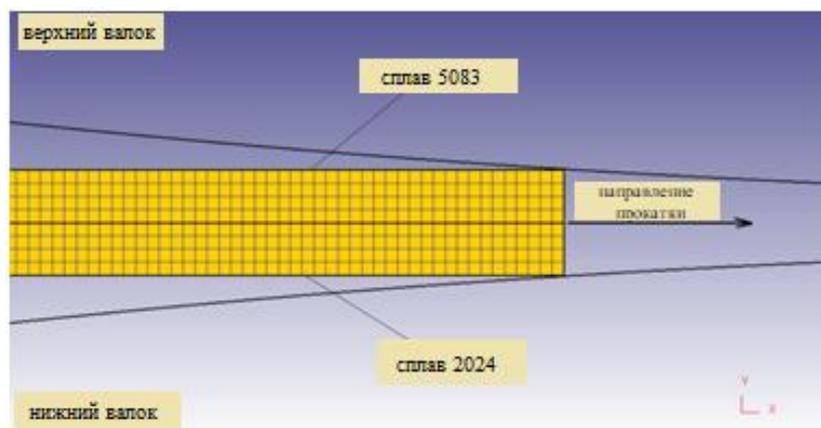


Рисунок 2.1 – Конечно-элементная модель листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 перед процессом асимметричного деформирования в программном комплексе «Deform 2D»

Исходные данные для моделирования процесса в «QForm»:

- 1) начальная толщина заготовок h_0 составляла 3,0 мм; 4,0 мм;
- 2) температура деформируемого металла 250°C ;

3) радиусы верхнего и нижнего рабочих валков R совпадали и принимались равными 170 мм;

4) коэффициент трения $f = 0,3$;

5) степень деформации (обжатие) ε от 50 % до 70 %;

6) композиты были составлены из сплавов алюминия 5083/2024, 5083/1070, 6061/2024, 6061/1070;

7) окружная скорость верхнего валка V_1 составила 10 об/мин, в то время как окружную скорость нижнего валка V_2 принимали от 2,5 до 6 об/мин для создания кинематической асимметрии процесса;

8) соединение слоев образовано функцией «склеивание»;

9) трение между слоями металла отсутствовало.

Конечно-элементная модель на примере листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070 из программного комплекса «QForm» представлена на рисунке 2.2.

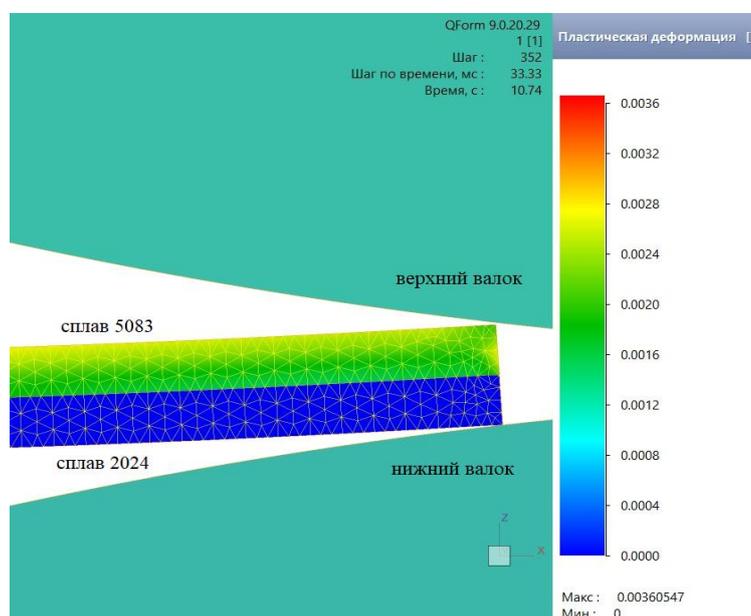


Рисунок 2.2 – Конечно-элементная модель листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 перед процессом асимметричного деформирования в программном комплексе «QForm»

При моделировании процесса асимметричной прокатки в представленных программных комплексах оценивали влияние отношения скоростей валков

$V_1 / V_2 = 1 \dots 4$ раз (в симметричном случае скорость верхнего вала составила 10 об/мин), коэффициента трения $f = 0,1 \dots 0,4$ и степени деформации $\varepsilon = 50 \dots 70$ % на значение эквивалентной деформации и угла наклона сетки Лагранжа. Это позволит определить необходимые и достаточные условия (попадание в границы областей соотношения суммарной эквивалентной деформации и угла сдвига в совокупности с прямолинейным движением листового слоистого алюминиевого композита) получения высоких значений прочности и технологической пластичности при асимметричном деформировании листовых слоистых алюминиевых композитов.

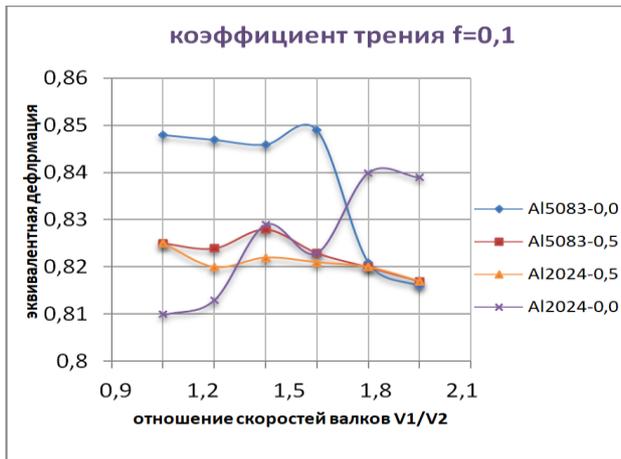
2.2 Влияние кинематической асимметрии на деформированное состояние в листовых слоистых алюминиевых композитах при асимметричной аккумулялирующей прокатке

В процессе реализации схемы совмещенного и чистого сдвига, являющейся наиболее эффективной с точки зрения получения высоких значений прочности и технологической пластичности, необходимо учитывать значение эквивалентной (истинной, накопленной) деформации. С её помощью возможно оценить деформированное состояние материала, т.к. она является инвариантной скалярной величиной [24]:

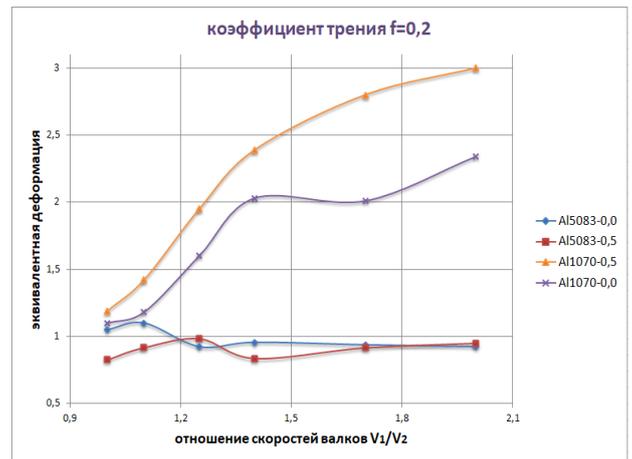
$$e = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + 6(\varepsilon_{11}^2 + \varepsilon_{22}^2 + \varepsilon_{33}^2)} \quad (2.5)$$

Достижение эквивалентной деформации большого значения (выше 3), позволит рассматривать процессы асимметричной аккумулялирующей прокатки как метод позволяющий получить повышение значения прочности и технологической пластичности. В данном случае уравнение 2.5 преобразуется в уравнение 1.3.

Зависимости влияния отношения скоростей валков и коэффициентов трения на эквивалентную деформацию для листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/2024 и 5083/1070 приведены на рисунках 2.3 – 2.5.



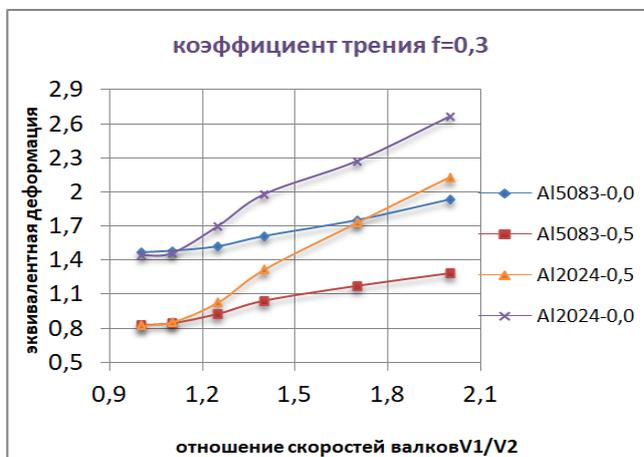
а



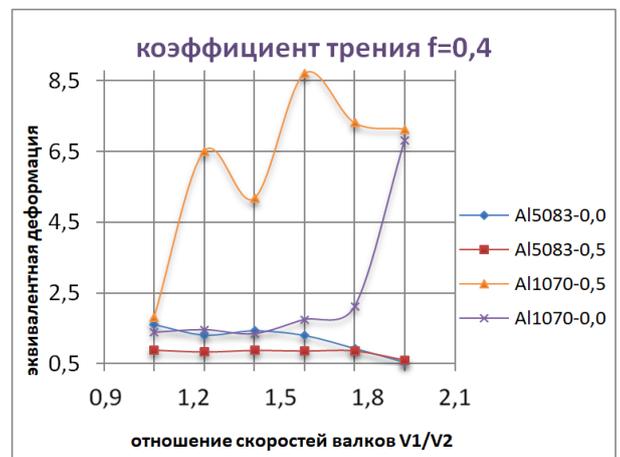
б

Al5083-0,0 – точки контакта сплава 5083 с валком, Al5083-0,5 – точки контакта сплава 5083 со сплавом 2024, Al2024-0,5 (Al1070-0,5) – точки контакта сплава 2024 (1070) со сплавом 5083, Al2024-0,0 (Al1070-0,0) – точки контакта сплава 2024 (1070) с валком

Рисунок 2.3 – Зависимость эквивалентной деформации от отношения скоростей валков при коэффициентах трения 0,1 (слева) и 0,2 (справа), композитов 5083/2024 (а) и 5083/1070 (б) после 1 цикла асимметричной аккумуляющей прокатки



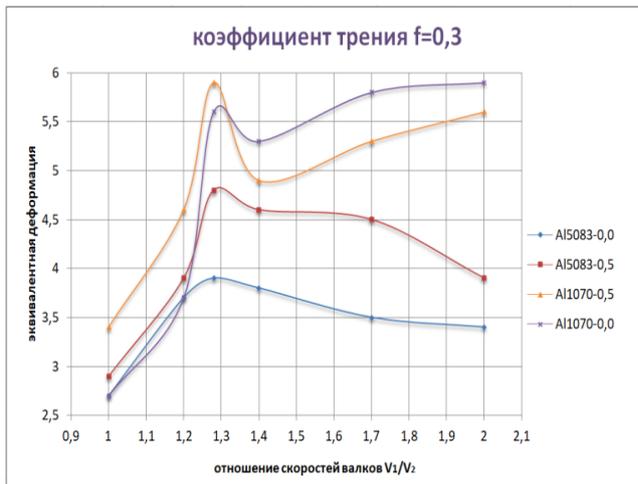
а



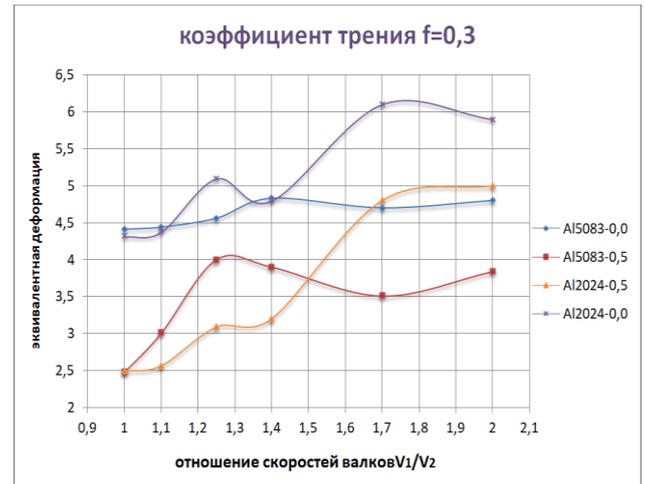
б

Al5083-0,0 – точки контакта сплава 5083 с валком, Al5083-0,5 – точки контакта сплава 5083 со сплавом 2024, Al2024-0,5 (Al1070-0,5) – точки контакта сплава 2024 (1070) со сплавом 5083, Al2024-0,0 (Al1070-0,0) – точки контакта сплава 2024 (1070) с валком

Рисунок 2.4 – Зависимость эквивалентной деформации от отношения скоростей валков при коэффициентах трения 0,3 (слева) и 0,4 (справа), композитов 5083/2024 (а) и 5083/1070 (б) после 1 цикла асимметричной аккумуляющей прокатки



а



б

Al5083-0,0 – точки контакта сплава 5083 с валком, Al5083-0,5 – точки контакта сплава 5083 со сплавом 1070, Al1070-0,5 – точки контакта сплава 1070 со сплавом 5083, Al1070-0,0 – точки контакта сплава 1070 с валком, Al2024-0,5 – точки контакта сплава 2024 со сплавом 5083, Al2024-0,0 – точки контакта сплава 2024 с валком

Рисунок 2.5 – Зависимость эквивалентной деформации от отношения скоростей валков при коэффициентах трения 0,3, композит 5083/1070 (а) и 5083/2024 (б) после 2 цикла асимметричной аккумуляющей прокатки

Для успешной реализации процесса желательно создавать условия, при которых коэффициент трения для обработки 5083/2024, 6061/2024 будет равен 0,3 и 0,4, а для 5083/1070, 6061/1070 – 0,2 и 0,3. В этом случае достигается необходимое значение как эквивалентной деформации (выше 3), так и угла сдвига (более 70 градусов), что подтверждают рисунки 2.6, 2.7. Более того, по рассчитанным значениям эквивалентной деформации очевидно, что наиболее вероятное повышение значений прочности и технологической пластичности соответствует случаям с соотношением толщины слоёв исходной заготовки 2 к 1 (3 мм).

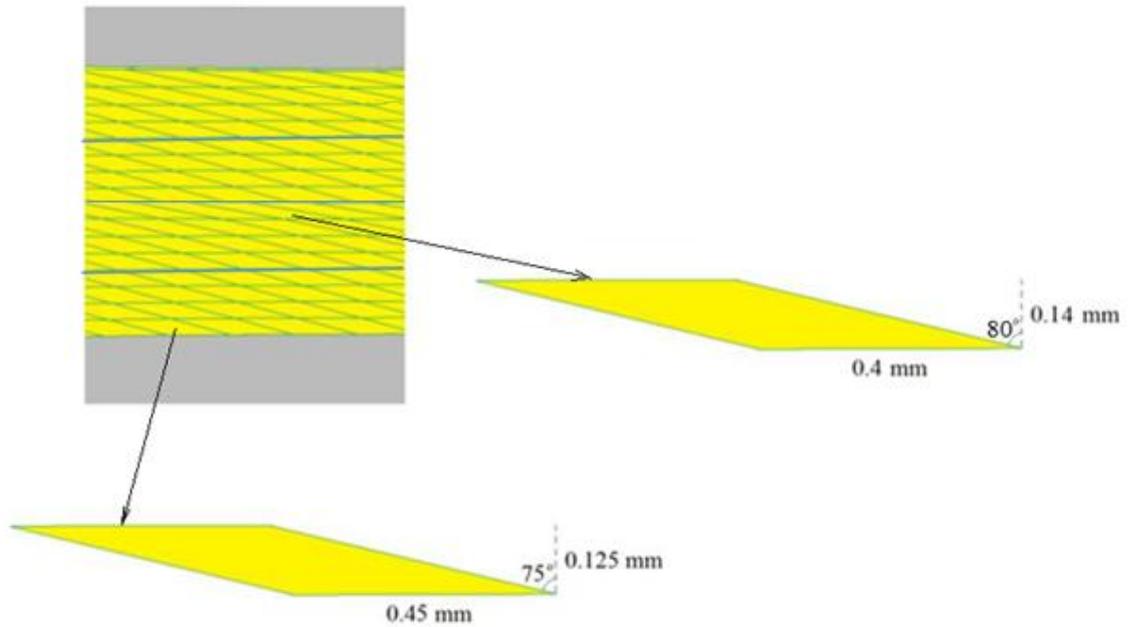


Рисунок 2.6 – Наклон сетки Лагранжа при асимметричном деформировании листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 с коэффициентом трения 0,3 после второго цикла асимметричной accumulating прокатки



Рисунок 2.7 – Распределение деформаций во втором цикле асимметричной accumulating прокатки листового слоистого алюминиевого композита 6061/2024

Итоговые результаты, представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Минимальные значения основных показателей, влияющих на свойства листовых слоистых алюминиевых композитов

Материал	1 цикл асимметричной аккумулирующей прокатки		2 цикл асимметричной аккумулирующей прокатки	
	Эквивалентная деформация	Угол сдвига	Эквивалентная деформация	Угол сдвига
Холодная прокатка				
5083/1070	0,5	55	3,3	75
5083/2024	0,8	50	3,0	70
6061/1070	0,7	55	3,2	75
6061/2024	0,9	50	3,0	70
Тёплая прокатка				
5083/1070	1,9	60	4,6	75
5083/2024	1,8	60	3,8	80
6061/1070	1,9	60	4,8	75
6061/2024	1,5	60	3,2	80

Из таблицы 2.2 видно, что для указанных листовых слоистых алюминиевых композитов при любых отношениях скоростей валков, значения эквивалентной деформации, полученной после первого цикла недостаточно (минимально получено 0,5), в связи с этим требуется второй цикл для достижения значений эквивалентной деформации в диапазоне 2...4.

2.3 Компьютерное моделирование изгиба полосы при обработке листовых слоистых алюминиевых композитов

Моделирование процесса асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов с изменением отношения скоростей валков показало следующие результаты: при увеличении скоростной асимметрии изменяется прямолинейность выхода металла из очага деформации. Наблюдается значительный изгиб переднего и заднего концов полосы практически во всех случаях моделирования.

Изгиб полосы (как переднего, так и заднего концов) изменялся в зависимости от отношения скоростей валков, коэффициента трения, толщины исходной заготовки, обжатия и марки алюминиевого сплава. Чем прочнее была марка

нижнего слоя, тем большая разность скоростей требовалась для прямолинейного выхода полосы. Минимальное значение отношения скоростей валков в зависимости от толщины исходной заготовки представлены в таблице 2.3.

Характер течения металла при симметричной и асимметричной аккумуляющей прокатке показано на рисунке 2.8.

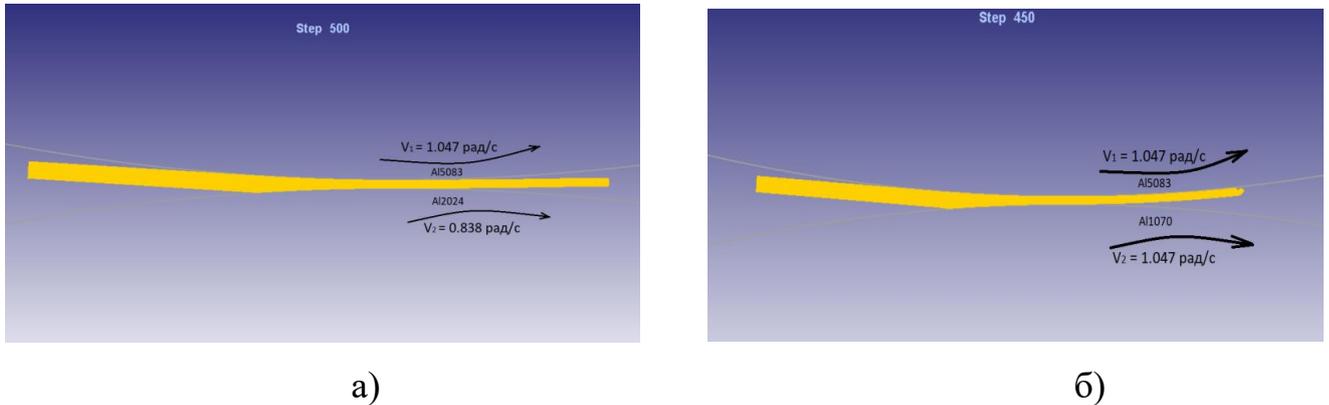


Рисунок 2.8 – Характер течения металла при а) асимметричной прокатке листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 и б) при прокатке листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070 с одинаковыми скоростями валков

Наиболее благоприятным случаем выступают эксперименты при коэффициенте трения $f = 0,3$. Результаты подтверждаются рисунками 2.9 (а и б) и 2.10 (а и б).

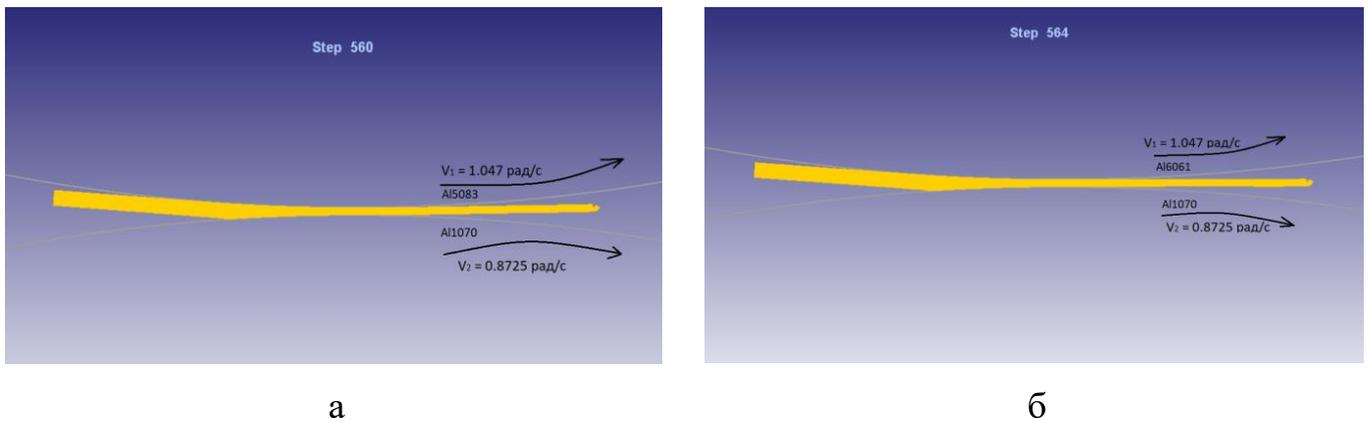


Рисунок 2.9 – Характер течения металла при асимметричном деформировании листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 (а) и 6061/1070 (б)

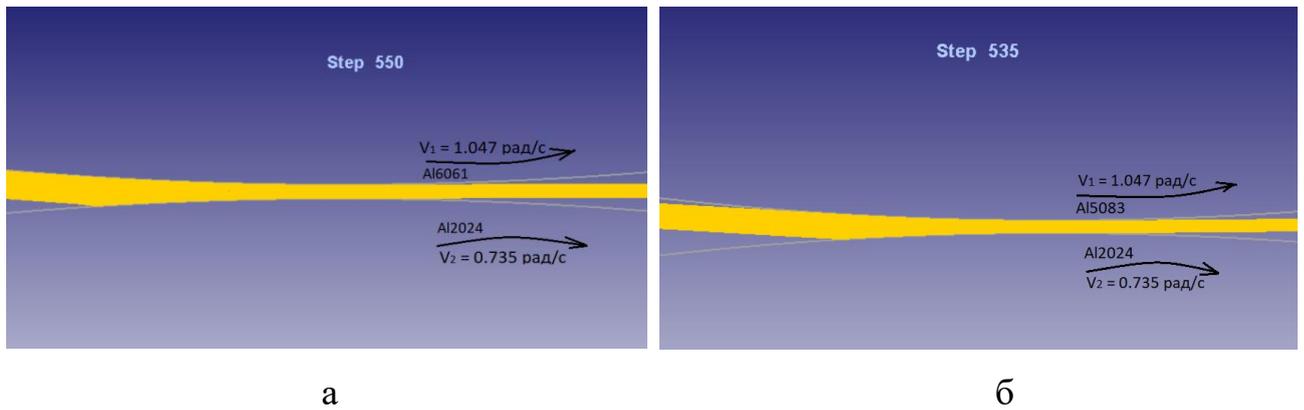


Рисунок 2.10 – Характер течения металла при асимметричном деформировании листовых слоистых алюминиевых композитов 6061/2024 (а) и 5083/2024 (б)

Очевидно, что металл обжимается неравномерно, а выравнивание полосы происходит в том случае, если продольная скорость верхней и нижней поверхности полосы будут неодинаковы.

В ходе исследования были найдены технологические параметры процесса асимметричной аккумуляющей прокатки, при которых металл выходил из очага деформации прямолинейно. В таблице представлены требуемые минимальные значения отношения скоростей валков при коэффициенте трения 0,3 в зависимости от толщины исходной заготовки (при обжатии 50 – 70%).

Таблица 2.3 – Значения требуемых отношений скоростей валков в зависимости от толщины заготовки при коэффициенте трения 0,3

Материал	Исходная толщина заготовок	Отношение скоростей валков при обжатии 50%	Отношение скоростей валков при обжатии 60%	Отношение скоростей валков при обжатии 70%
5083/1070 6061/1070	1 мм (5083; 6061) + 1 мм (1070)	1,25	1,7	2
	2 мм (5083; 6061) + 1 мм (1070)	1,7	2	2,5
	2 мм (5083; 6061) + 2 мм (1070)	2	2,5	3,3
5083/2024 6061/2024	1 мм (5083; 6061) + 1 мм (2024)	1,7	2	2,5
	2 мм (2024) + 1 мм (5083; 6061)	2	2,5	3,3
	2 мм (5083; 6061) + 2 мм (2024)	2,5	3,3	3,5

Показано, что при увеличении общей толщины заготовки, также как и обжатия и прочности материала требуется увеличивать отношение скоростей валков для прямолинейного выхода листового слоистого композита из очага деформации.

2.4 Исследование поведения межслойной границы в листовых слоистых алюминиевых композитах при асимметричной аккумулярующей прокатке

При моделировании значения эквивалентной деформации в каждом слое композита анализировали отдельно, также как и в межслойной границе. Расчет межслойной границы проводился путем анализа средних точек соприкосновения двух композитов. Свойства этой границы отличаются от сплавов, из которых она состоит. Чтобы получить оптимальную обработку, необходимо учитывать особенности обоих сплавов и исключать возможность образования дефектов в межслойной границе. Основным недостатком данной границы в листовых слоистых алюминиевых композитах является практическая невозможность получения одинаковых значений пластичности и прочности по сравнению с основными металлами.

В случае 5083/2024 зависимости эквивалентной деформации от изменения толщины металла показывают, что межслойная граница деформируется меньше, чем алюминиевый сплав 2024 и сплав 5083. Этот вывод можно сделать на основании значений эквивалентной деформации, показанных на рисунках 2.11 и 2.12. Стоит отметить, что фигура 2.11 характеризует процесс после первого цикла обработки. Несмотря на максимальную эквивалентную деформацию 2,3 после обработки 5083, 2,2 после обработки 2024, межслойная граница характеризуется относительно низкими показателями 1,2. Однако после второго цикла аккумулярующей прокатки наблюдаются высокие значения эквивалентной деформации, начиная с минимального отношения скоростей валков. Так, при отношении скоростей валков 1,1 минимальное значение эквивалентной деформации составляет 3,2, а при 2 – 4,8, максимальное значение изменяется от

5,2 для случая с отношением скоростей валков 1,4 до 8,5 для отношения разницы в 2 раза.

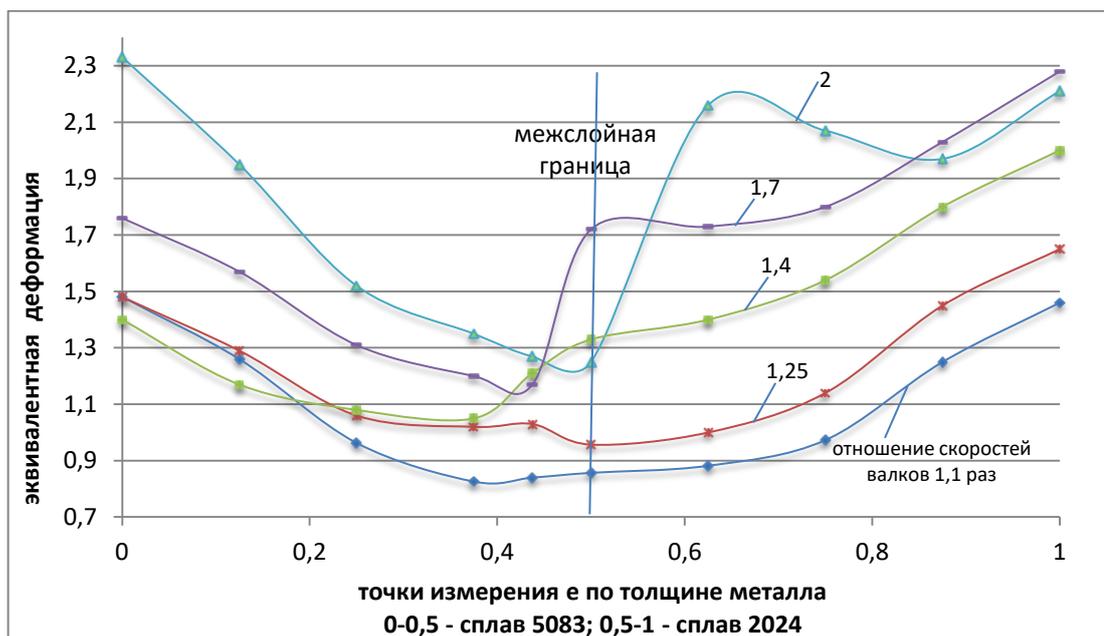


Рисунок 2.11 – Зависимость эквивалентной деформации от вида сплава в первом цикле обработки аккумулярующей прокаткой (композит 5083/2024)

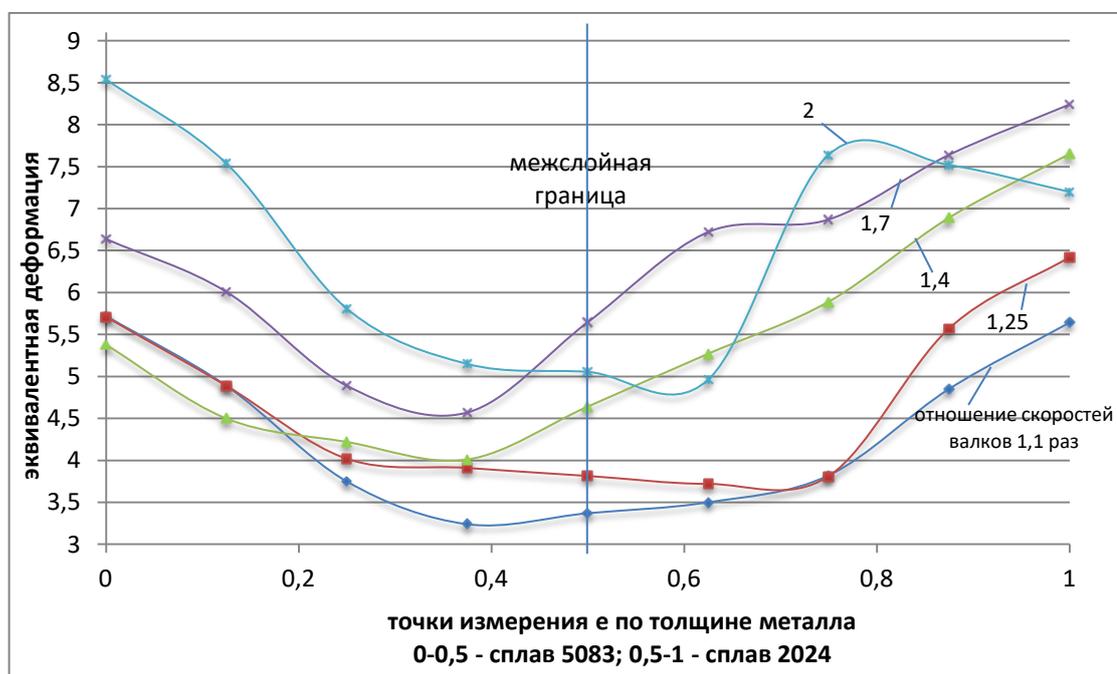


Рисунок 2.12 – Зависимость эквивалентной деформации от вида сплава во втором цикле обработки аккумулярующей прокаткой (композит 5083/2024)

Компьютерное моделирование процесса асимметричной аккумулярующей прокатки алюминиевых композитов 5083/1070 имеет другие результаты:

межслойная граница деформируется сильнее, чем алюминиевый сплав 1070, но меньше, чем сплав 5083. На рисунках 2.13 и 2.14 показаны результаты моделирования. Максимальное значение эквивалентной деформации составляет 1,5 после обработки 5083, 4,9 после обработки 1070, переходный слой показывает 2,9. После 2-го цикла асимметричной аккумуляющей прокатки (за исключением отношения скоростей валков в 1,1 раз) возможно получение значений эквивалентной деформации больше 3.

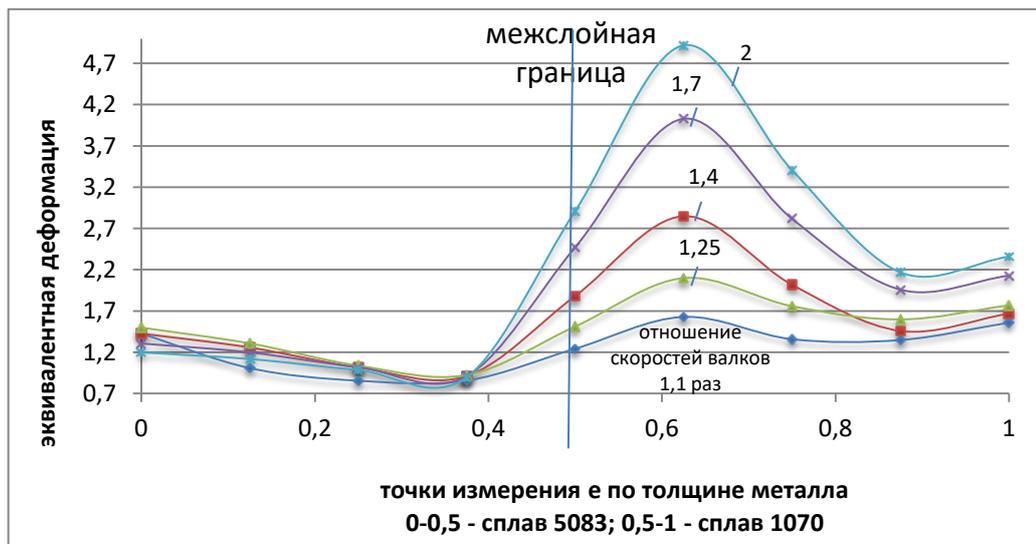


Рисунок 2.13 – Зависимость эквивалентной деформации от вида сплава в первом цикле обработки аккумуляющей прокаткой (композит 5083/1070)

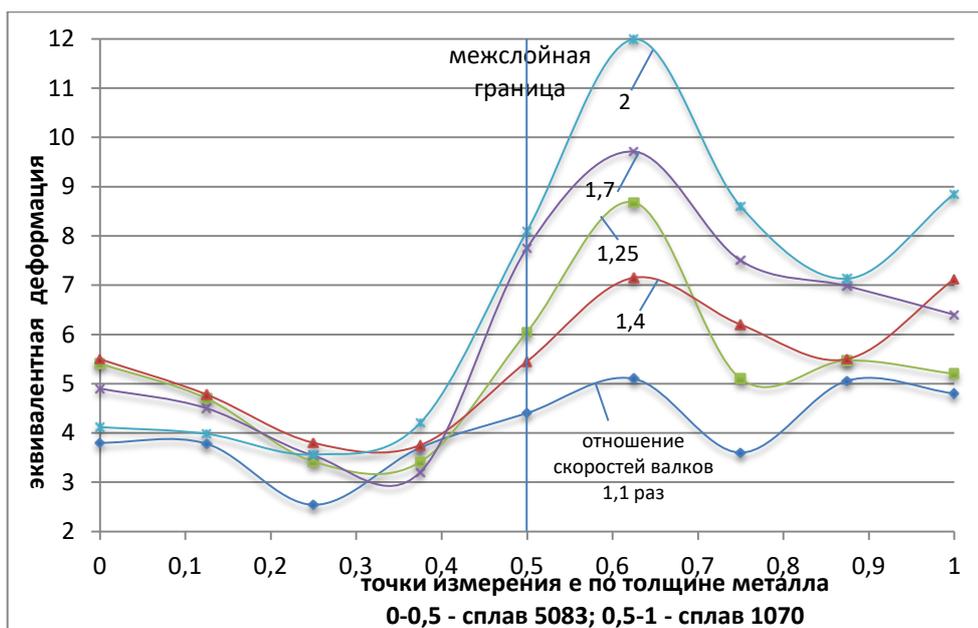


Рисунок 2.14 – Зависимость эквивалентной деформации от вида сплава во втором цикле обработки аккумуляющей прокаткой (композит 5083/1070)

Показатели деформированного состояния межслойной границы изменяются монотонно в 1 цикле асимметричной аккумулялирующей прокатки, во втором цикле наблюдаются некоторые отклонения, которые не снижаются за пределы среднего значения эквивалентной деформации. Результаты представлены на рисунках 2.15 и 2.16.

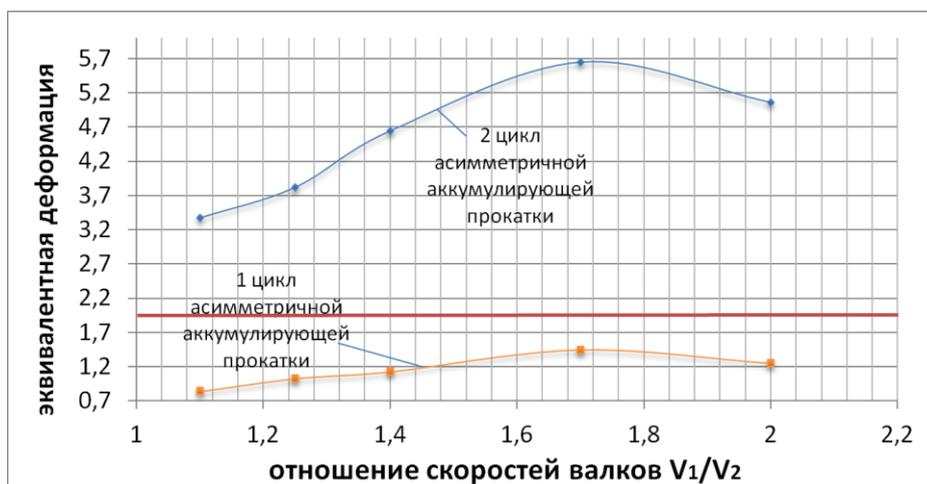


Рисунок 2.15 – Зависимость эквивалентной деформации от значений рассогласования скоростей валков в 1 и 2 циклах аккумулялирующей прокатки композита 5083/2024 в межслойной границе

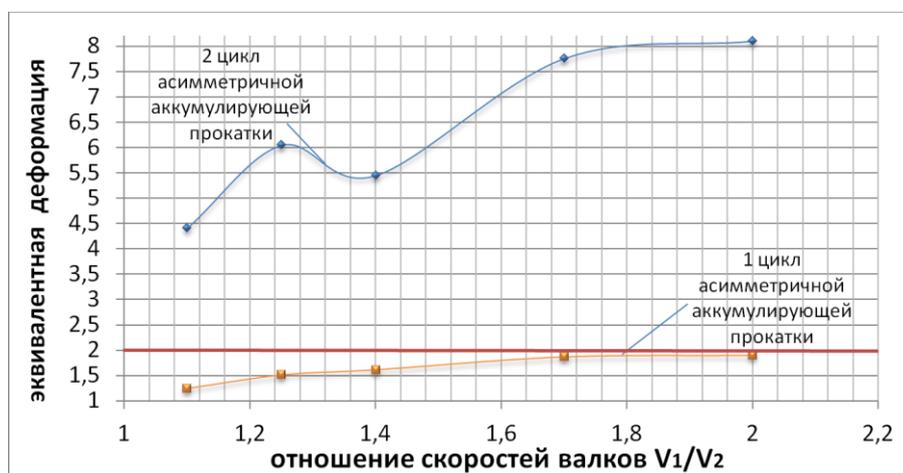


Рисунок 2.16 – Зависимость эквивалентной деформации от значений рассогласования скоростей валков в 1 и 2 циклах аккумулялирующей прокатки композита 5083/1070 в межслойной границе

Также было проанализировано состояние границ двух соединяемых металлов в листовых слоистых алюминиевых композитах. Представляется возможным оценить изменение поведения криволинейности слоев композита относительно

влияния одного на другой. Так как скорость верхнего валка в асимметричном случае будет выше скорости нижнего валка, расположение слоев композита будет соответствовать данному факту – верхний слой металла представляет собой сплав 5083 и нижний слой представлен сплавами 2024 и 1070. Криволинейность слоев оценивалась по длине очага деформации, в представленных графиках начальное положение слоев металла относительно друг друга представлено нулевой отметкой в виде прямой.

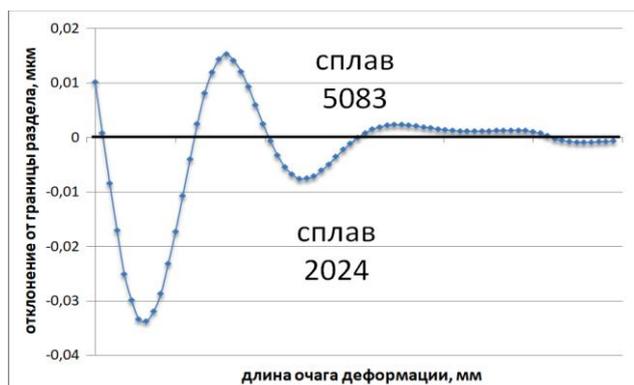
Поведение материала при изменении отношений скоростей валков закономерно. Кривые имеют схожий вид, особенно в случаях симметричной прокатки и асимметричной с отношением скоростей валков в 1,1, а также при отношении скоростей валков в 1,25 и 1,7. При этом отклонение сплава 5083 от центральной оси композита наиболее ярко выражены именно при данных параметрах. Также с увеличением отношения скоростей валков верхняя граница уровня отклонения увеличивается от 0,015 до 0,08 для композита 5083/2024 и от 0,015 до 0,12 для композита 5083/1070. Резкие нижние и верхние экстремумы говорят о неравномерности деформаций и неравномерном распределении слоев друг относительно друга. Результаты представлены на рисунках 2.17 и 2.18.

При увеличении толщины исходной заготовки отклонение увеличивается незначительно: максимально до 0,13 для толщины 3 мм и до 0,15 для толщина 4 мм для 5083/1070; до 0,10 для 3 мм и до 0,11 для 4 мм для 5083/2024, результаты представлены в таблице 2.4.

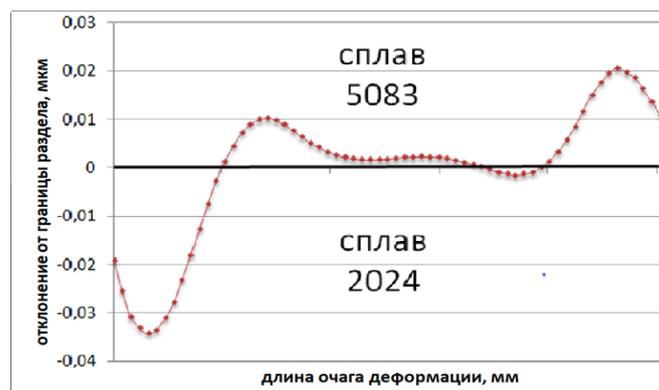
Таблица 2.4 – Максимальные значения отклонения слоев от оси листовых слоистых алюминиевых композитов в зависимости от исходной толщины заготовки

Материал	Исходная толщина заготовок	Отклонение слоев от оси при обжатии 50%	Отклонение слоев от оси при обжатии 60%
1	2	3	4
5083/1070 6061/1070	1 мм (5083; 6061) + 1 мм (1070)	0,12 мкм	0,11 мкм
	2 мм (5083; 6061) + 1 мм (1070)	0,13 мкм	0,12 мкм
	2 мм (5083; 6061) + 2 мм (1070)	0,15 мкм	0,14 мкм

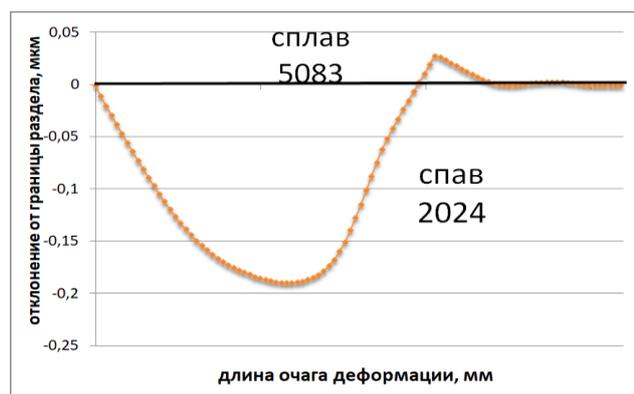
1	2	3	4
5083/2024 6061/2024	1 мм (5083; 6061) + 1 мм (2024)	0,20 мкм	0,18 мкм
	2 мм (2024) + 1 мм (5083; 6061)	0,21 мкм	0,19 мкм
	2 мм (5083; 6061) + 2 мм (2024)	0,21 мкм	0,20 мкм



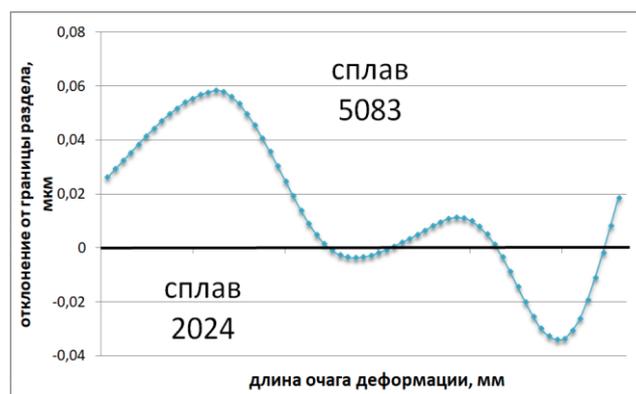
а



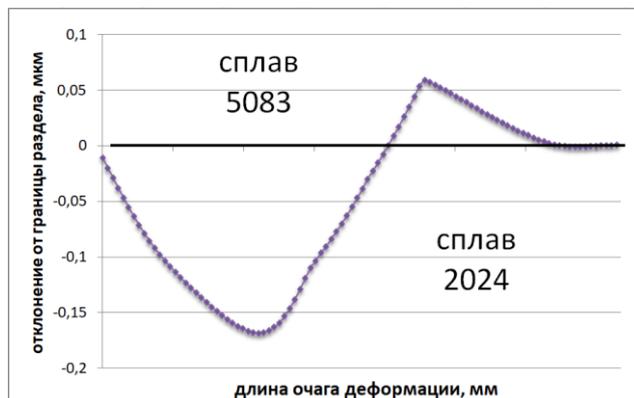
б



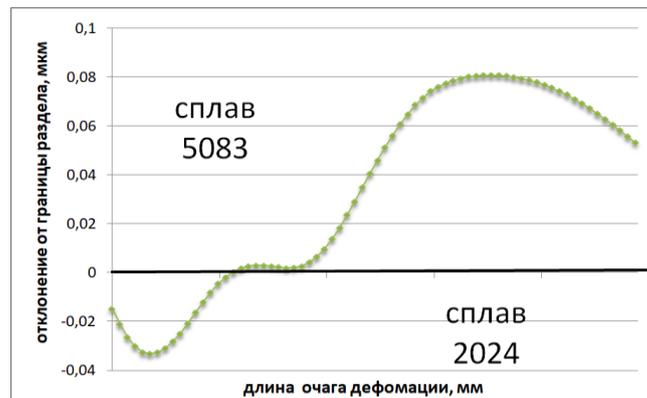
в



г

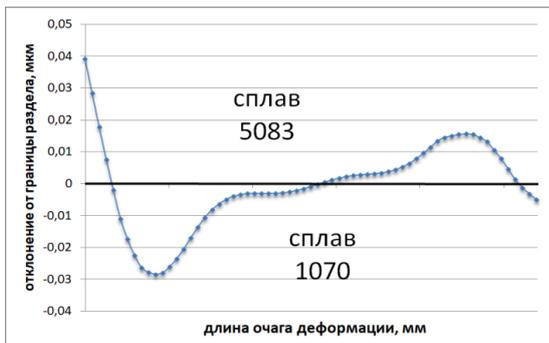


д

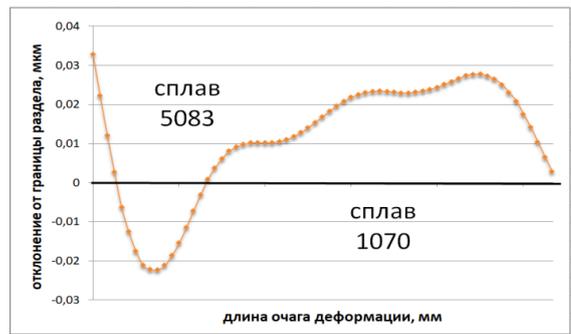


е

Рисунок 2.17 – Распределение слоев композитов 2024 и 5083 по длине очага деформации (а – аккумулярующая прокатка 5083/2024 при отношении скоростей валков 1, б – при отношении скоростей валков 1,1, в – 1,25, г – 1,4, д – 1,7, е – 2)



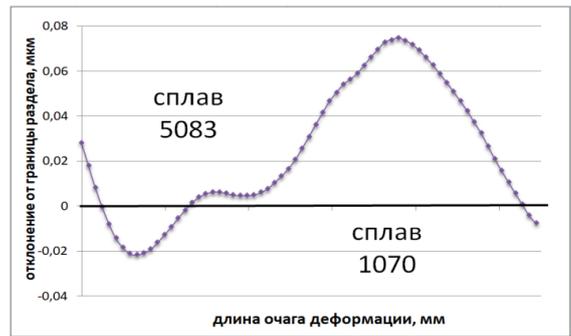
а



б



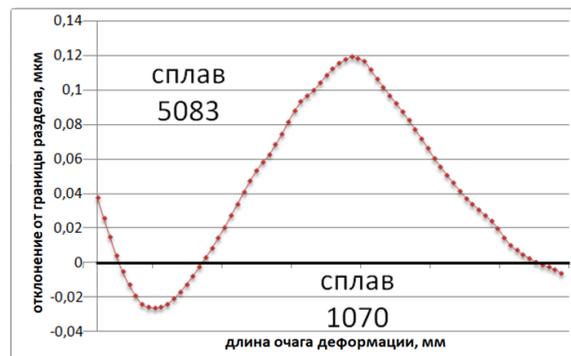
в



г



д



е

Рисунок 2.18 – Распределение слоев сплавов 1070 и 5083 по длине очага деформации (а – аккумулярующая прокатка 5083/1070 при отношении скоростей валков 1, б – при отношении скоростей валков 1,1, в – 1,25, г – 1,4, д – 1,7, е – 2)

Необходимо понимать, что неравномерность деформации обуславливается определенными причинами: особенностями оборудования и формоэлементами материала, наличием химических ликваций и распределением температуры по объему заготовки, условиями трения, деформациями и т.д. В случае влияния факторов в совокупности, неравномерность деформаций неизбежна. С увеличением соотношения разности скоростей валков происходит увеличение неравномерности деформации: это подтверждается значениями отклонения слоев металла друг от друга.

В данном случае при проведении натурального эксперимента будет важно учесть то, как обрабатывается поверхность сплавов перед соединением, как проходят диффузионные процессы, насколько сильно разогреется металл в процессе его прокатки. Данные знания позволят исключить образование дефектов в области межслойной границы, например, таких как расслоение. Помимо этого, неоднородность является фактором, из-за которого практически невозможно получить одинаковые значения пластичности и прочности по сравнению с основными металлами.

2.5 Анализ силовых параметров процесса асимметричной аккумуляющей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов

Был произведен анализ крутящих моментов на валках, которые являются важным параметром при определении прочности валковой системы. На рисунке 2.19 представлены графики зависимостей крутящих моментов верхнего и нижнего валков от времени прокатки.

В данном случае заметно, что кривые имеют похожий вид вне зависимости от значения рассогласования скоростей валков, однако можно выделить отличие в значениях крутящих моментов. При увеличении рассогласования скоростей валков на 10% в каждом последующем эксперименте, крутящий момент возрастал на 28% по сравнению с первым случаем, на 20% относительного второго случая, на 17% при сравнении четвертого и третьего экспериментов и на 11% в пятом расчете (касается верхнего валка, который находился в контакте с более прочным алюминиевым сплавом 5083). Крутящий момент нижнего валка, задействованный при обработке материала 2024, изменяется с течением времени плавно, не показывая резких скачков при изменении его скорости. Только по достижению скорости нижнего валка 0,628 рад/с, его крутящий момент возрос на 50%, что объясняется соответствием подобранной скорости марке обрабатываемого алюминиевого сплава.

Также было проанализировано усилие прокатки в процессе обработки листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 при изменении значения

отношения скоростей валков. Основные результаты сведены в график, изображенный на рисунке 2.20 и представляющий собой зависимость усилия прокатки от отношения скоростей валков по длине очага деформации.

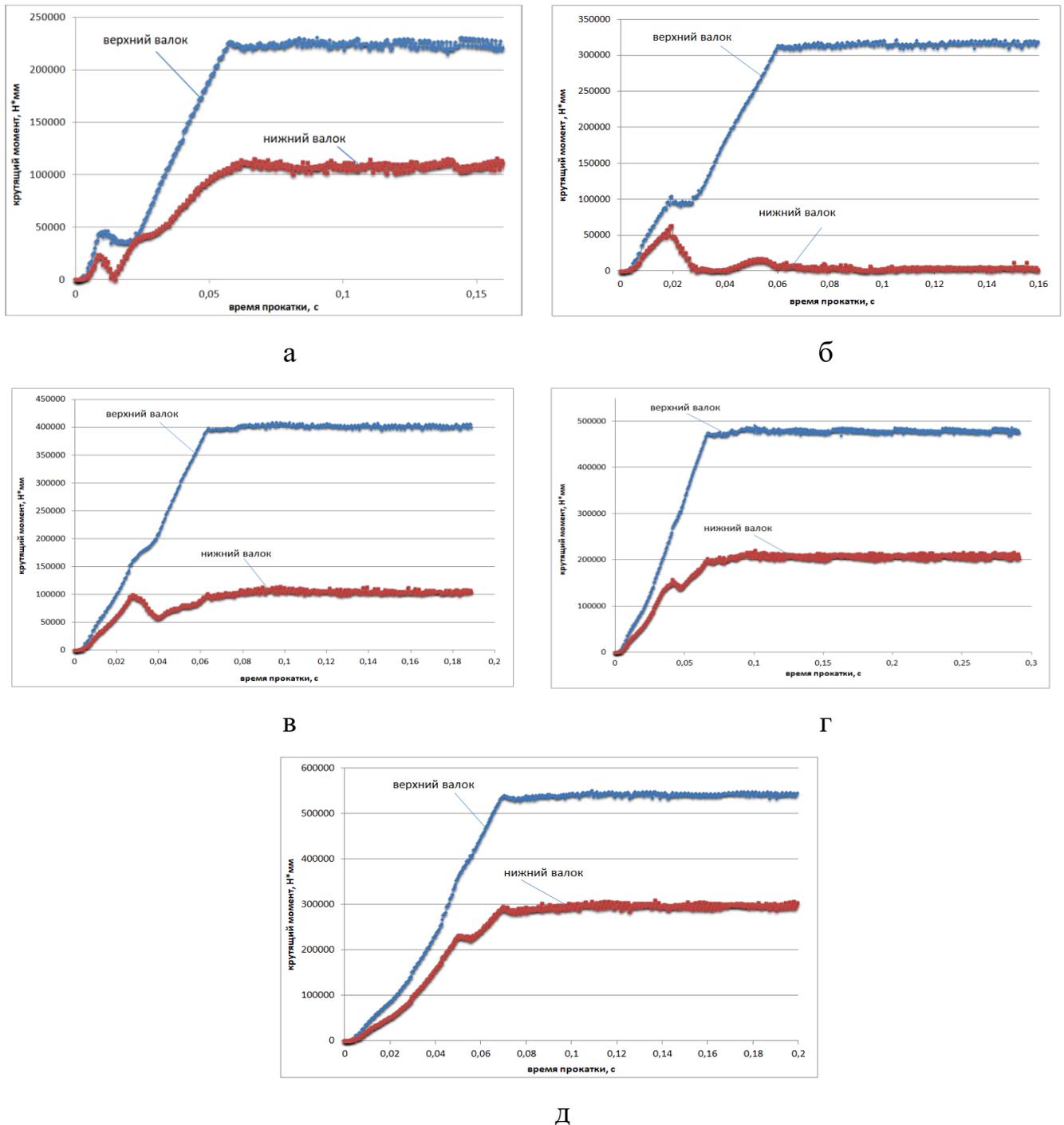


Рисунок 2.19 – Зависимости крутящих моментов верхнего и нижнего валков от времени прокатки композита 5083/2024 (а – асимметричная прокатка композита 5083/2024 при отношении скоростей валков 1,1, б – при отношении скоростей 1,25, в – при отношении скоростей 1,4, г – при отношении скоростей 1,7, д – при отношении скоростей 2)

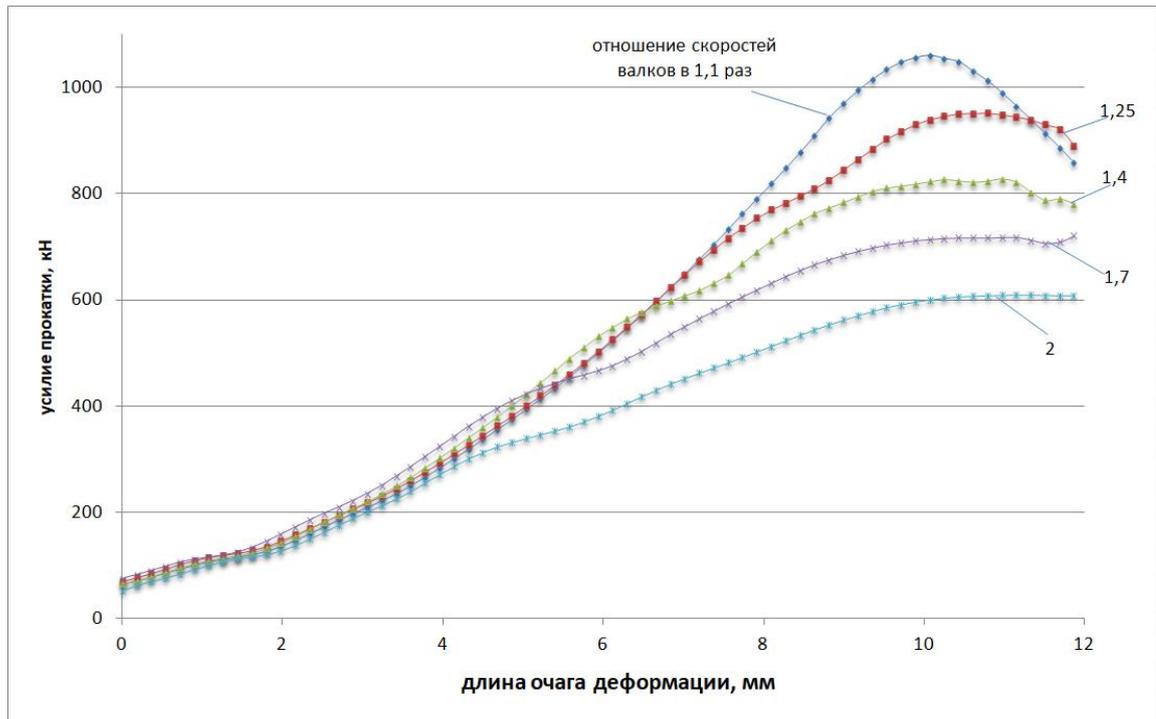


Рисунок 2.20 – Зависимость усилия прокатки от отношения скоростей валков по длине очага деформации при прокатке листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024

Как следует из графика, с ростом значения отношения скоростей в анализируемом диапазоне при постоянном коэффициенте трения 0,3, усилие прокатки снижается равномерно, при этом кривые имеют аналогичное строение. При увеличении значения эквивалентной деформации, что происходит при отношении скоростей валков 1,7, усилие прокатки снижается в 1,5 раза по сравнению с симметричным случаем.

2.6 Выводы по главе 2

1) Произведена постановка задачи для компьютерного моделирования асимметричной аккумулярующей прокатки в программном комплексе «Deform 2D» и «QForm». Установлены граничные и начальные условия для компьютерного моделирования холодной и теплой аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070, 6061/1070, 5083/2024, 6061/2024.

2) Выявлено, что рациональным принять значения коэффициента трения f не ниже 0,2 (для листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070,

6061/1070) и не выше 0,3 (для листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/2024, 6061/2024).

3) Значение отношения скоростей валков для прямолинейного движения металла необходимо повышать при увеличении толщины исходной заготовки, обжатия и прочности обрабатываемого материала (в пределах от 1 до 4).

4) Распределение слоев листовых слоистых алюминиевых композитов по длине очага деформации зависело от значения отношения скоростей валков (в пределах от 1 до 4), обжатий (50 – 70%), также как от марок используемых алюминиевых сплавов (1070, 2024, 5083, 6061) и исходные общие толщины заготовок (2 – 4 мм).

5) Показано, что для получения минимальной сдвиговой деформации ($\epsilon > 2...4$) и угла сдвига ($\varphi > 65...70^\circ$) необходимо провести минимум 2 цикла обработки как для листовых слоистых композитов 5083/2024, 6061/2024, так и для 5083/1070, 6061/1070.

6) Наиболее рациональное соотношение толщин слоёв в исходной заготовке составляет 2 к 1 (3 мм), при котором достигаются максимальные значения эквивалентной деформации и угла сдвига ($\epsilon > 2...4$, $\varphi > 65...70^\circ$).

7) При увеличении значения отношения скоростей валков и эквивалентной деформации снижается усилие прокатки (по сравнению с симметричным случаем в 1,5 раза).

ГЛАВА 3. ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ И КОРРЕКТИРОВКА РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ЛИСТОВЫХ СЛОИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ

В 1 и 2 главах приведен анализ известных технических решений получения листовых слоистых алюминиевых композитов и результатов компьютерного моделирования асимметричной аккумулярующей прокатки. В настоящей главе рассмотрены следующие вопросы:

1. Проверка адекватности компьютерной модели асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070, 5083/2024, 6061/1070, 6061/2024;

2. Экспериментальное исследование влияния различных параметров процесса на НДС, геометрические характеристики, энергосиловые параметры асимметричной аккумулярующей прокатки, механические свойства и структуру материала.

3.1 Материалы, оборудование и методы исследования для получения листовых слоистых алюминиевых композитов

Для подтверждения адекватности компьютерных моделей были проведены лабораторные исследования процесса асимметричной аккумулярующей прокатки прокатки для листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070, 5083/2024, 6061/1070, 6061/2024. Химический состав данных сплавов представлен в таблице 2.1.

Для исследования использовался стан асимметричной прокатки 400 лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» [214], который показан на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Стан асимметричной прокатки 400 лаборатории механики
градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Данный агрегат представляет собой листовой одноклетьевой стан дуо асимметричной прокатки с индивидуальными приводами рабочих валков. Максимальное усилие прокатки составляет 2500 кН, моменты ограничены значением в 2×65 кН·м. Радиус валков – 170 мм, максимальная скорость прокатки 250 мм/сек. Максимальная толщина заготовок составляет 100 мм, а ширина соответственно 340 мм.

После получения листового слоистого композита, проводились исследования механических свойств. Твёрдость образцов измерялась на твердомере EMCO TEST M4C/R G3. Метод измерения твёрдости по Бринеллю (НВ 5/125) был подобран в соответствии с начальными характеристиками исходных образцов.

На испытательной машине Shimadzu Servopulser U-type проводились испытания на растяжение полученных образцов. Определялись предел прочности и предел текучести, а также удлинение на листовых слоистых алюминиевых композитах.

Исследование микроструктуры проводилось на металлографическом инвертированном микроскопе Meiji-200 TechnoMeijiTechnoCorp в комплекте с программой анализа изображений Thixomet PRO ООО «Тиксомет».

После каждого последнего цикла обработки методом асимметричной аккумулярующей прокатки выделялись образцы, которые проходили механические испытания.

Деформирование на стане асимметричной прокатки 400 проводили в симметричном и асимметричном режимах. Для каждого из образцов было проведено от 1 до 8 циклов обработки. Прокатка листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070, 5083/2024, 6061/1070 и 6061/2024 проводилась в соответствии с технологией асимметричной аккумулярующей прокатки. Значение отношения скоростей валков варьировалось от 1,25 до 5. Общая толщина исходных образцов составляла от 2 мм до 4 мм, каждый слой в отдельности имел толщину 1 мм и 2 мм. Часть сплавов подвергалась предварительной термической обработке или нагреву непосредственно перед прокаткой, осуществляемому после каждого цикла обработки. Время нагрева непосредственно перед прокаткой отличалось и зависело от вида, размера и технологических параметров (отношение скоростей валков, коэффициента трения), но входило в пределы 350 – 420° С, время выдержки – от 5 до 30 минут.

Перед холодной прокаткой поверхность соединения алюминиевых сплавов обрабатывалась: производилась зачистка образцов для снятия оксидных пленок в одних случаях абразивом (шлифовальной бумагой с зернистостью Р40, Р180 и Р240), в других – шлифовальными щётками. Проводилось обезжиривание для удаления загрязнений растворителем 646. Образцы до зачистки и после представлены на рисунке 3.2. Транспортировка материала до клетки осуществлялась после шлифовки незамедлительно для уменьшения времени взаимодействия алюминиевых сплавов с кислородом воздуха и быстрого образования крупного слоя оксидной плёнки.

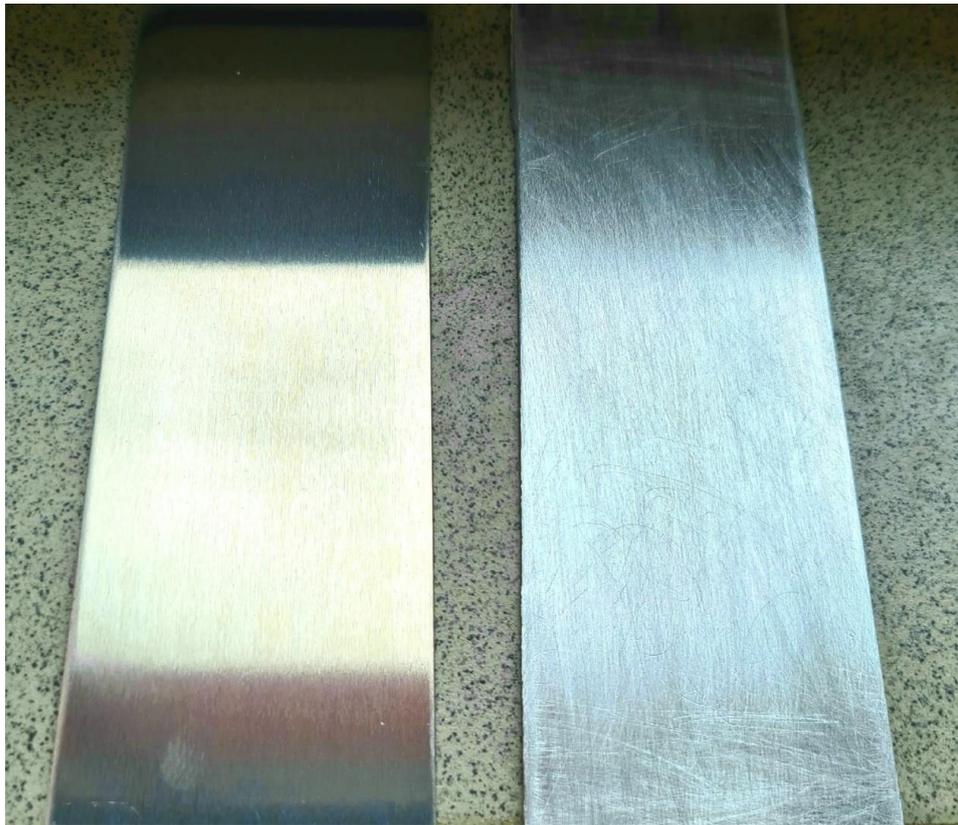


Рисунок 3.2 – Образцы алюминиевых сплавов до и после зачистки абразивным материалом

Сварка слоёв осуществлялась в очаге деформации во время деформирования. Прокатка проводилась без применения охлаждающей жидкости и других приемов, вызывающих изменение коэффициента трения. Для увеличения коэффициента трения перед экспериментальными исследованиями прокатывали не менее 5 алюминиевых листов.

3.2 Анализ возможностей аккумулирующей прокатки при симметричном и асимметричном деформировании листовых слоистых алюминиевых композитов

Для предварительного опробования технологических решений были получены образцы из листового слоистого алюминиевого композита 5083/5083 и 6061/6061 путем симметричного и асимметричного деформирования. Основные параметры прокатки 5xxx и 6xxx серий представлены в таблицах 3.1 и 3.2 [215 – 217]. На рисунке 3.3 проиллюстрированы некоторые результаты экспериментов (образец 1 и 5).

Таблица 3.1 – Входные и выходные параметры обработки алюминиевых сплавов 5^й серии на стане 400 асимметричной прокатки (без термической обработки)

Образец	№ прохода	Отношение скоростей валков, V_1/V_2	Начальная толщина, мм	Толщина после прокатки, мм	Усилие прокатки, кН	Комментарий
1	1	4/4	4 (2+2)	2,1	912	образец не сварен, образовался порыв в середине образца
2	1	4/2,2	4 (2+2)	2,0	490	образец сварен, однако кромка сильно повреждена
3	1	4/2,1	4 (2+2)	1,9	490	образец сварен, качество удовлетворительное направлен на 2 цикл
3.1	2	4/2,2	3,8 (1,9+1,9)	1,8	509	образец сварен, качество удовлетворительное
4	1	4/2,1	4 (2+2)	1,9	490	образец сварен, качество удовлетворительное направлен на 2 цикл
4.1	2	4/2,1	3,8 (1,9+1,9)	1,8	372	образец сварен, качество удовлетворительное



а



б

Рисунок 3.3 – Образец 1 (а) и 5 (б) после симметричной деформации

Таблица 3.2 – Входные и выходные параметры обработки алюминиевых сплавов 6^й серии на стане 400 асимметричной прокатки (без термической обработки)

Образец	№ прохода	Отношение скоростей валков, V_1/V_2	Начальная толщина, мм	Толщина после прокатки, мм	Усилие прокатки, кН	Комментарий
5	1	5/5	4 (2+2)	2,3	980	образец не сварен, образовался порыв в середине образца
6	1	5/2,6	4 (2+2)	2	540	образец сварен, качество удовлетворительное направлен на 2 цикл
6.1	2	5/2,6	4 (2+2)	1,9	470	образец сварен, качество удовлетворительное направлен на 3 цикл
6.2	3	5/2,7	3,8 (1,9+1,9)	1,7	450	образец сварен, качество удовлетворительное направлен на 4 цикл
6.3	4	5/2,7	3,4 (1,7+1,7)	1,6	402	образец сварен, качество удовлетворительное

В итоге образцы 1 и 5 (симметричные случаи) были разрушены во время обработки, слои металлов не сварились между собой, кроме того образовался порыв посередине образцов.

При обработке образцов 2 и 6 (асимметричные случаи) по сравнению с образцом 1 и 5 (симметричные случаи) усилие прокатки снизилось в среднем на 50% (с 912 кН до 490 кН для 5083/5083 и с 980 кН до 540 кН для 6061/6061).

Обжатие варьировалось от 50% до 57% за проход, а суммарная степень обжатия составила 77,5% для 5^й серии (за 2 цикла) и 95% для 6^й серии (за 4 цикла). Отношение скоростей валков варьировалось от 1,8 до 2 в зависимости от прохода.

В 3, 4 и 6 образцах после двух циклов получили существенное снижение усилия прокатки как в 1, так и во 2 циклах (по сравнению с образцами 1 и 5) без повреждения кромки.

После всех циклов обработки был произведен замер твердости на твердомере EMCO TEST M4C/R G3 методом Бринелля. Результаты показывают повышение твердости для листового слоистого алюминиевого композита 5083/5083 в 1,8 раз после 2 циклов обработки (исходная твердость – 81,8 ед., полученная – 147 ед.), для листового слоистого алюминиевого композита 6061/6061 – в 2,6 раза после 4 циклов обработки (исходная твердость – 65 ед., полученная – 168 ед.)

Симметричная обработка характеризуется пониженным запасом пластичности – образцы разрушаются при обжатиях 42 – 50% в первом цикле аккумулирующей прокатки. Это позволило исключить метод симметричной обработки в холодном виде для дальнейших экспериментов с листовыми слоистыми алюминиевыми композитами.

Асимметричная прокатка характеризуется уменьшением образования дефектов (все образцы показали хорошую свариваемость давлением). Технологическая пластичность значительно выросла – возможно обрабатывать образцы при обжатии 77,5% (как для 5083/5083) и 95% (как для 6061/6061). При этом в асимметричном случае такое значений обжатий не является предельным.

3.3 Проверка адекватности компьютерных моделей процесса асимметричного деформирования листовых слоистых алюминиевых композитов

Для проверки адекватности компьютерных моделей сравнивались:

- 1) Послойное распределение сплавов, полученное при компьютерном моделировании и при прокатке на стане асимметричной прокатки;
- 2) Усилия прокатки при моделировании и в процессе прокатки.

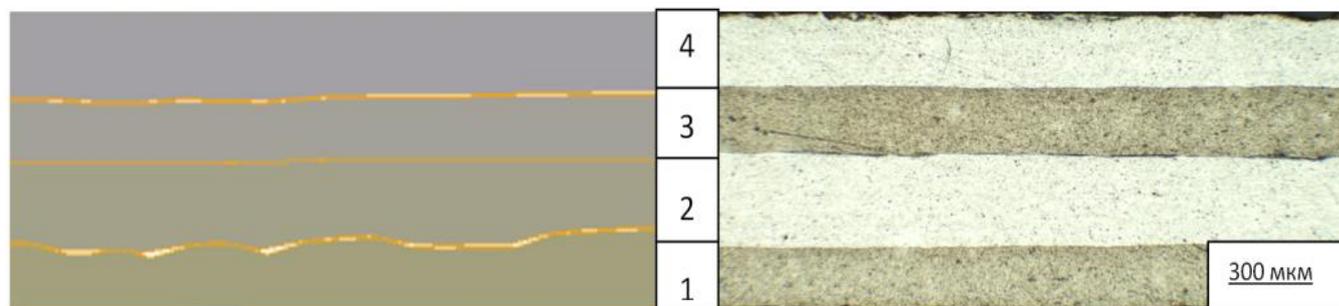
Для сравнения было проведено 10 экспериментов с одинаковыми начальными и граничными условиями. Для определения сходимости результатов, измерялся каждый слой листового слоистого алюминиевого композита, а также

усилия прокатки (в примере представлен листовой слоистый алюминиевый композит 5083/2024). Асимметричная аккумуляирующая прокатка осуществлялась при отношении скоростей валков 3,3, радиус валков составил 170 мм, исходная общая толщина заготовки – 3 мм (при толщине слоя из сплава 5083 – 1 мм, из сплава 2024 – 2 мм). Предварительно осуществлялся нагрев заготовок при 380° С в течение 15 минут для первого цикла обработки и в течение 8 – 10 минут перед вторым циклом. Суммарное обжатие за два цикла составило 77 – 78%. Проведено 10 экспериментов с одинаковыми параметрами прокатки.

Результаты представлены на рисунке 3.4 и в таблицах 3.3, 3.4.

Таблица 3.3 – Результаты сходимости компьютерной модели и натурального эксперимента послойного распределения в листовом слоистом алюминиевом композите 5083/2024

№ слоя композита, вид сплава	Расчетная толщина слоя, мм	Экспериментальная толщина слоя, мм
1 (сплав 5083)	0,195	0,206
2 (сплав 2024)	0,319	0,325
3 (сплав 5083)	0,195	0,206
4 (сплав 2024)	0,291	0,263
Итого	1	1



а

б

Рисунок 3.4 – Распределение слоев листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 при (а) компьютерном моделировании и (б) натурном эксперименте

Из таблицы 3.3 видно, что среднее отклонение результатов компьютерной модели и натурального эксперимента составляет 5,5%, что объясняется погрешностями проведения эксперимента.

Таблица 3.4 – Результаты сходимости компьютерной модели и натурального эксперимента обработки листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 (по усилиям)

Цикл прокатки	Расчетное усилие, кН	Экспериментальное усилие, кН
1	608	605 – 615
2	371	367 – 380

Нормальность распределения подтверждается показателями, характеризующими форму распределения: асимметрия и эксцесс. Например, для первого цикла плотность распределения анализируемого параметра отображается уравнением:

$$f(x) = \frac{1}{3,521 * \sqrt{2\pi}} \exp \left[\frac{(x - 608)^2}{2 * 3,521^2} \right] \quad (3.1)$$

С доверительной вероятностью 95% истинное значение расчётного усилия составляет 608 кН для первого цикла асимметричной аккумулярующей прокатки и 371 кН для второго цикла.

3.4 Экспериментальное определение рациональных параметров асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов

Следующим этапом производилась исследование режимов асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070, 6061/1070, 5083/2024, 6061/2024. План эксперимента представлен в таблицах 3.5 (для первого цикла аккумулярующей прокатки) и 3.6 (для второго цикла аккумулярующей прокатки).

Таблица 3.5 – План экспериментов асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов (1 цикл)

Сплав	Отношение скоростей валков, $\frac{\text{об/мин}}{\text{об/мин}}$	Толщины слоев	Виды термической обработки	Обжатие, %
5083/1070 6061/1070	10/2 (5)	5083 (1 мм) + 1070 (1 мм) 6061 (1 мм) + 1070 (1 мм)	1. Без предварительной термической обработки или 2. Отжиг при 420°С в течении 90-120 минут или 3. Нагрев перед прокаткой при 380°С в течении 5-30 минут или 4. Нагрев перед прокаткой при 420°С в течении 5-20 минут	50 – 70
	10/2,5 (4)			
	10/3 (3,3)	5083 (2 мм) + 1070 (1 мм) 6061 (2 мм) + 1070 (1 мм)		
	10/3,5 (2,8)			
	10/4 (2,5)			
	10/4,5 (2,2)	5083 (2 мм) + 1070 (2 мм) 6061 (2 мм) + 1070 (2 мм)		
	10/5 (2)			
	10/6 (1,7)			
	10/10 (1)			
	5083/1070 6061/1070	10/2 (5)		
10/2,5 (4)				
10/3 (3,3)		5083 (2 мм) + 5083 (2 мм) 6061 (2 мм) + 6061 (2 мм)		
10/3,5 (2,8)				
10/4 (2,5)		1070 (1 мм) + 1070 (1 мм)		
10/4,5 (2,2)				
10/5 (2)		1070 (2 мм) + 1070 (2 мм)		
10/6 (1,7)				
10/10 (1)				

Сплав	Отношение скоростей валков, $\frac{\text{об/мин}}{\text{об/мин}}$	Расположение слоев	Термическая обработка	Обжатие, %
6061/2024 5083/2024	10/2 (5)	5083 (1 мм) + 2024 (1 мм) 6061 (1 мм) + 2024 (1 мм)	1. Без предварительной термической обработки или	50 – 70
	10/2,5 (4) 10/3 (3,3) 10/3,5 (2,8) 10/4 (2,5)	5083 (2 мм) + 2024 (1 мм) 6061 (2 мм) + 2024 (1 мм)	2. Отжиг при 420°C в течении 90-120 минут или	
	10/4,5 (2,2) 10/5 (2) 10/6 (1,7) 10/10 (1)	5083 (2 мм) + 2024 (2 мм) 6061 (2 мм) + 2024 (2 мм)	3. Нагрев перед прокаткой при 380°C в течении 5-30 минут или	
		5083/1070 + 5083/1070 6061/1070 + 6061/1070	4. Нагрев перед прокаткой при 420°C в течении 5-20 минут	

Таблица 3.6 – План экспериментов асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов (2 цикл)

Сплав	Отношение скоростей валков, $\frac{\text{об/мин}}{\text{об/мин}}$	Расположение слоев	Термическая обработка	Обжатие, %
5083/1070 6061/1070	10/2,5 (4)	5083/5083 + 1070/1070 6061/6061 + 1070/1070	1. Нагрев перед прокаткой при 380°С в течении 5-30 минут или 2. Нагрев перед прокаткой при 420°С в течении 5-20 минут	50 – 70
	10/3 (3,3)			
	10/3,5 (2,8)			
	10/4 (2,5)			
	10/4,5 (2,2)	5083/1070 + 5083/1070 6061/1070 + 6061/1070		
	10/5 (2)			
	10/6 (1,7)			
10/10 (1)				
5083/2024 6061/2024	10/2,5 (4)	5083/2024 + 5083/2024 6061/2024 + 6061/2024		
	10/3 (3,3)			
	10/3,5 (2,8)			
	10/4 (2,5)			
	10/4,5 (2,2)			
	10/5 (2)			
	10/6 (1,7)			
10/10 (1)				

Были выявлены режимы аккумулярующей прокатки, позволяющие получить высокие значения прочности и технологической пластичности, высокий уровень сварки слоёв композита и удовлетворительное качество поверхности. Данные режимы включили в себя холодную и теплую аккумулярующую прокатку, с проведением двух циклов асимметричного деформирования. Режимы включающие в себя значение отношения скоростей валков 5 были исключены из исследований из-за плавления металла в очаге деформации.

Холодная асимметричная аккумулярующая прокатка осуществлялась:

- 1) без использования термической обработки;
- 2) с использованием термической обработки (отжиг при температуре 420° С в течение 90 – 120 минут с последующим охлаждением на воздухе).

Вариант 1 может применяться при обработке листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 6061/1070, состоящей в проведении первого этапа первого цикла со сплавом 5083 или 6061 и второго этапа первого цикла со сплавом 1070. Поверхность соединения слоёв обязательно должна подготавливаться (зачистка, обезжиривание). Однако 2 цикл асимметричной аккумулярующей прокатки не рекомендуется проводить без термической обработки, т.к. это может привести к расслаиванию, как показано на рисунке 3.5а.

По варианту 2 отжиг сплавов 1070, 2024, 5083 и 6061 проводился при температуре 420°C в течение 90 – 120 минут с последующим охлаждением на воздухе. В этом случае возможно появление необратимых дефектов, подобным тому, который указан на рисунке 3.5а.

Тёплая асимметричная аккумулярующая прокатка осуществлялась:

- 1) с предварительным нагревом перед прокаткой при температуре 420°C в течение 15 – 30 минут;
- 2) с предварительным нагревом перед прокаткой при температуре 380°C в течение 5 – 30 минут.

При этом в обоих случаях остывание металла происходило в промежутке транспортировки образцов от печи до клетки.

Вариант 1 применялся при обработке листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070, 6061/1070 во 2 цикле асимметричной аккумулярующей прокатки, 5083/2024 и 6061/2024 во всех циклах обработки и характеризовался образованием дефектов «передав» и «волна» во всех случаях, как показано на рисунке 3.5б.



а



б

Рисунок 3.5 – Листовой слоистый алюминиевый композит 5083/2024 после обработки холодной (а) и тёплой (б) аккумулярующей прокаткой (2 цикл)

Вариант 2 может применяться для обработки листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 6061/1070 в 1 и 2 цикле (в зависимости от расположения слоёв); 5083/2024 и 6061/2024 во всех циклах обработки. Основные результаты представлены на рисунках 3.6 – 3.9.



Рисунок 3.6 – Листовой слоистый алюминиевый композит 5083/2024 после второго цикла асимметричной аккумуляющей прокатки



Рисунок 3.7 – Листовой слоистый алюминиевый композит 5083/1070 после второго цикла асимметричной аккумуляющей прокатки



а



б

Рисунок 3.8 – Листовой слоистый алюминиевый композит 6061/2024 после первого (а) и второго (б) цикла асимметричной аккумуляющей прокатки



Рисунок 3.9 – Листовой слоистый алюминиевый композит 6061/1070 после второго цикла асимметричной аккумуляющей прокатки

Требуемую плоскостность и качество поверхности возможно получить при скоростях валков – 10 об/мин для нижнего и 3 – 6 об/мин для верхнего валка. Величина обжатия составила от 50% до 67%.

В ряде случаев наблюдалось смещение слоев относительно друг друга в очаге деформации, что приводило либо к отсутствию соединения между сплавами, либо частичному свариванию и завороту передней части заготовки по типу дефекта «серповидность». Причинами образования данных дефектов могут быть недостаточные степени деформации, недостаточная температура в очаге деформации, неверно подобранные условия трения и значения отношений скоростей валков. Одним из решений данной проблемы может выступать предварительная механическая обработка поверхности слоистого материала в первом цикле прокатки с формированием рельефа на поверхности заготовки с помощью рельефных валков и последующим разглаживанием заготовки в следующем цикле обработки.

Была проведена оценка влияния значений отношений скоростей валков на технологическую пластичность и усилия прокатки. Результаты по листовому слоистому алюминиевому композиту 5083/2024 с исходной толщиной слоёв 1 мм (5083) и 2 мм (2024) и установленным межвалковым зазором 1,2 мм представлены в таблице 3.7; по листовому слоистому алюминиевому композиту 5083/1070 с исходной толщиной слоёв 1 мм (1070) и 2 мм (5083) и установленным межвалковым зазором 1,2 мм представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.7 – Влияние значений отношений скоростей валков на технологическую пластичность и усилия прокатки листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024

Отношение скоростей валков, $\frac{\text{об/мин}}{\text{об/мин}}$	Конечная толщина листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024, мм	Относительное обжатие, %	Усилие, кН
10/10 (1)	1,90	37	1330
10/6 (1,7)	1,60	47	1080
10/5 (2)	1,53	49	990
10/4,5 (2,2)	1,47	51	940
10/4 (2,5)	1,35	55	900
10/3,5 (2,8)	1,25	58	790
10/3 (3,3)	1,20	60	700
10/2,5 (4)	1,00	67	600
10/2 (5)	расплавился		

Таблица 3.8 – Влияние значений отношений скоростей валков на технологическую пластичность и усилия прокатки листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070

Отношение скоростей валков, $\frac{\text{об/мин}}{\text{об/мин}}$	Конечная толщина листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070, мм	Относительное обжатие, %	Усилие, кН
1	2	3	4
10/10 (1)	не сварилось		
10/8 (1,25)			
10/7 (1,4)	1,8	40	860
10/6 (1,7)	1,7	43	710
10/5 (2)	1,45	52	630
10/4 (2,5)	1,3	57	520

1	2	3	4
10/3 (3,3)	1,2	60	300
10/2 (5)	расплавился		

Показано, что с увеличением отношения скоростей рабочих валков с 1 до 4 для листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 усилие прокатки снижается с 1330 кН до 600 кН при одновременном повышении относительного обжатия с 37% до 67%. Для листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070 усилие прокатки снижается с 600 кН до 300 кН, относительное обжатие возрастает с 40% до 60% при увеличении отношения скоростей валков с 1,4 до 3,3. При отношении скоростей валков 1 и 1,25 образцы сплавов 5083 и 1070 не сваривались. Отношение скоростей валков 5 характеризуется плавлением листовых слоистых алюминиевых композитов в очаге деформации в обоих случаях.

Все образцы, прошедшие два цикла обработки методом аккумулярующей прокатки испытывались для определения значений твёрдости, предела прочности, предела текучести и относительного удлинения. В дальнейшем полученные характеристики сравнивались со свойствами используемых в настоящее время в автомобилестроении и космической отрасли материалов. Результаты представлены в таблице 3.9 по образцам с исходной общей толщиной 3 мм.

Таблица 3.9 – Результаты механических испытаний листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/2024, 5083/1070, 6061/2024, 6061/1070

Марка	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	НВ, ед
5083/1070	210	304	10	сторона 5083: 132
				сторона 1070: 65
5083/2024	215	333	12	сторона 5083: 130
				сторона 2024: 106
6061/1070	192	212	2	сторона 6061: 115
				сторона 1070: 47
6061/2024	184	240	2	сторона 6061: 113
				сторона 2024: 97

По аналогии с рисунком 1.12 была найдена взаимосвязь угла сдвига φ и эквивалентной деформации, а также область реализации процесса асимметричного деформирования листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024, при попадание в которую обеспечивается получение высоких значений механических свойств, что подтверждается экспериментально и показано на рисунках 3.10 и 3.11.

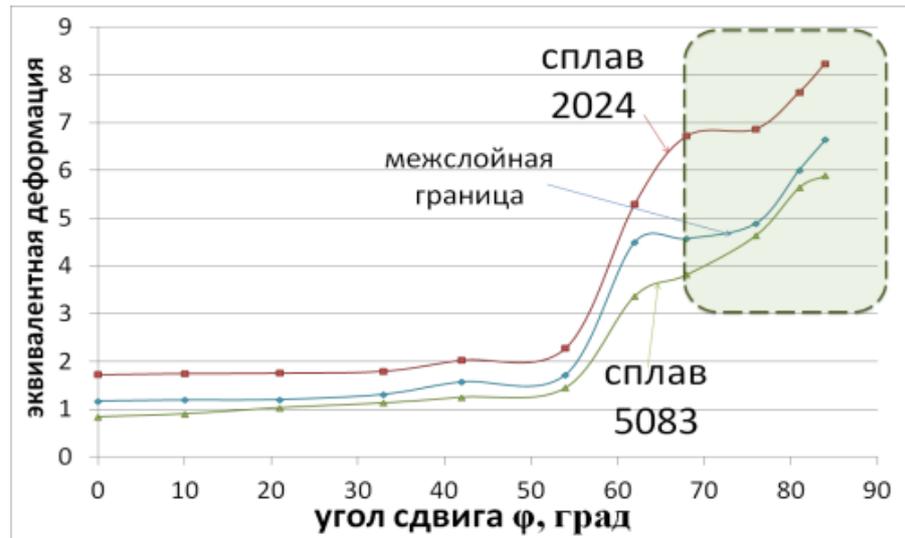


Рисунок 3.10 – Взаимосвязь эквивалентных деформаций и углов сдвига при асимметричной аккумулярующей прокатке листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024

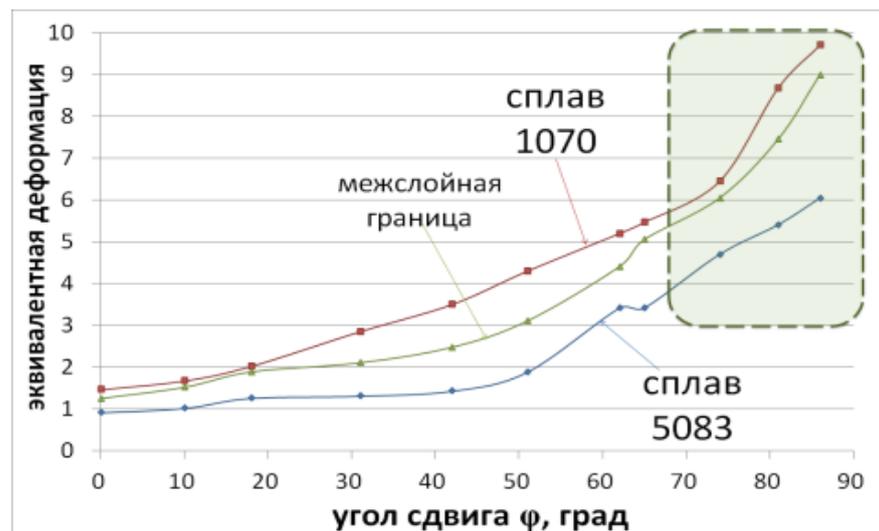


Рисунок 3.11 – Взаимосвязь эквивалентных деформаций и углов сдвига при асимметричной аккумулярующей прокатке листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070

В данном случае определены необходимые границы областей соотношений суммарных эквивалентных деформаций и углов сдвига для слоистых листовых композитов из алюминиевых сплавов (5083/1070, 5083/2024) при попадании в которые гарантированно обеспечивается получение высоких значений прочности и технологической пластичности в каждом из слоев и в межслойной границе. Значение эквивалентной деформации ϵ должно быть не менее 3, а угол сдвига φ не менее 70° для данных листовых слоистых алюминиевых композитов.

После механических испытаний листовых слоистых алюминиевых композитов сплав 6061 был исключён из возможных вариантов использования в качестве второго слоя, т.к. при исследуемых параметрах значения прочностных и пластической характеристик не соответствуют требованиям нормативной документации (EN 485-2:1993 и ГОСТ 21631-76). Границы областей гарантированного одновременного повышения прочности и технологической пластичности проката, отличающиеся соотношением суммарных эквивалентных деформаций ($\epsilon > 3$) и углов сдвига ($\varphi > 70^\circ$) в этом случае не рациональны, и необходимо установить иные границы, при которых значения суммарных эквивалентных деформаций ϵ будут превышать 4,8, а угол сдвига φ будет более 80° . Применение данных сплавов для изготовления топливных баков ракет носителей (6061/1070) и габаритных частей кузова автомобилей (6061/2024) требует больше затрат, т.к. очевидно, что для получения необходимых свойств нужно провести третий цикл асимметричной аккумулялирующей прокатки.

Отдельно был проведён анализ влияния отношения скоростей валков на изменение механических свойств листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024. Результаты представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Результаты механических испытаний листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/2024 при изменении отношения скоростей валков

Отношение скоростей валков $V_1/V_2, \frac{\text{об/мин}}{\text{об/мин}}$	Цикл прокатки	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	НВ, ед (сторона 5083 / сторона 2024)
10/2,5 (4)	1	284	340	4	109 / 89
	2	235	314	12,5	76 / 75

Отношение скоростей валков $V_1/V_2, \frac{\text{об/мин}}{\text{об/мин}}$	Цикл прокатки	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	НВ, ед (сторона 5083 / сторона 2024)
10/3 (3,33)	1	268	321	7	109 / 94
	2	215	333	12	130 / 106
10/3,5 (2,86)	1	271	330	6	101 / 82
	2	259	327	11	87 / 83
10/4 (2,5)	1	307	341	8	108 / 98
	2	261	325	12	105 / 98
10/4,5 (2,22)	1	292	342	6	110 / 95
	2	304	347	6,5	96 / 87
10/5 (2)	1	305	353	6	109 / 94
	2	328	349	4,5	102 / 97
10/6 (1,67)	1	316	353	3	108 / 98
	2	303	336	3	108 / 98
10/10 (1)	1	278	343	6,5	117 / 85
	2	283	345	7	109 / 101

Из полученных данных видно, что в первом цикле асимметричной аккумулярующей прокатки наблюдается значительный градиент в слоистых алюминиевых композитах, что характеризуется значениями твёрдости в разных слоях (например, НВ = 109 ед. со стороны 5083 и НВ = 89 ед. со стороны 2024 при отношении скоростей 4 и т.д.). Во втором цикле деформирования в большинстве случаев происходит не только снижение значений твёрдости, но и выравнивание значений первой и второй стороны относительно друг друга (например, НВ = 76 ед. со стороны 5083 и НВ = 75 ед. со стороны 2024 при отношении скоростей 4 и т.д.). Объясняется это тем, что при деформации металла во втором цикле асимметричной аккумулярующей прокатки происходит усреднение характеристик листового слоистого композита из-за последовательного расположения слоёв.

Для оценки изменения механических свойств (прочности, выраженной в виде характеристик предела текучести σ_T , временного сопротивления разрыву σ_B и пластичности в виде характеристики относительного удлинения δ) представлены графики, показанные на рисунках 3.12 – 3.14.

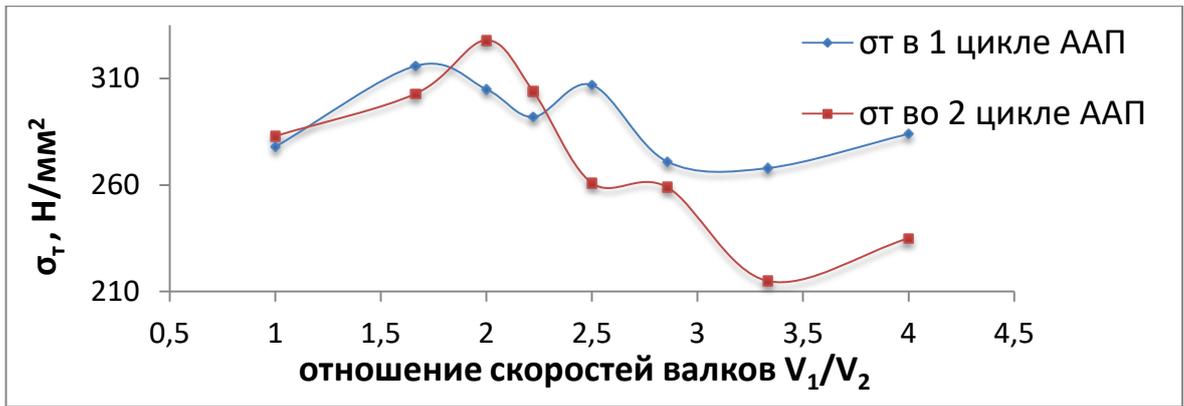


Рисунок 3.12 – Зависимость значений предела текучести σ_T в первом и втором цикле асимметричной аккумулярующей прокатки (ААП) от отношения скоростей валков

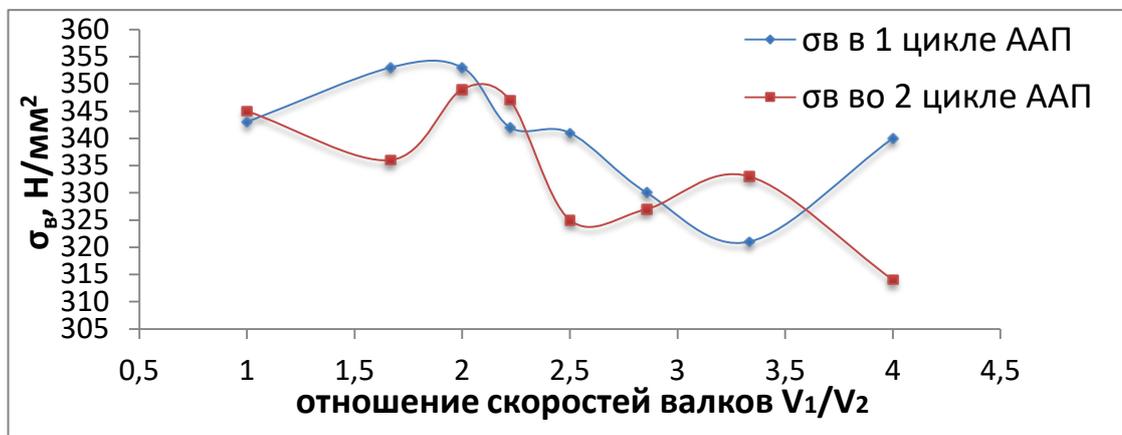


Рисунок 3.13 – Зависимость значений временного сопротивления разрыву σ_B в первом и втором цикле асимметричной аккумулярующей прокатки (ААП) от отношения скоростей валков

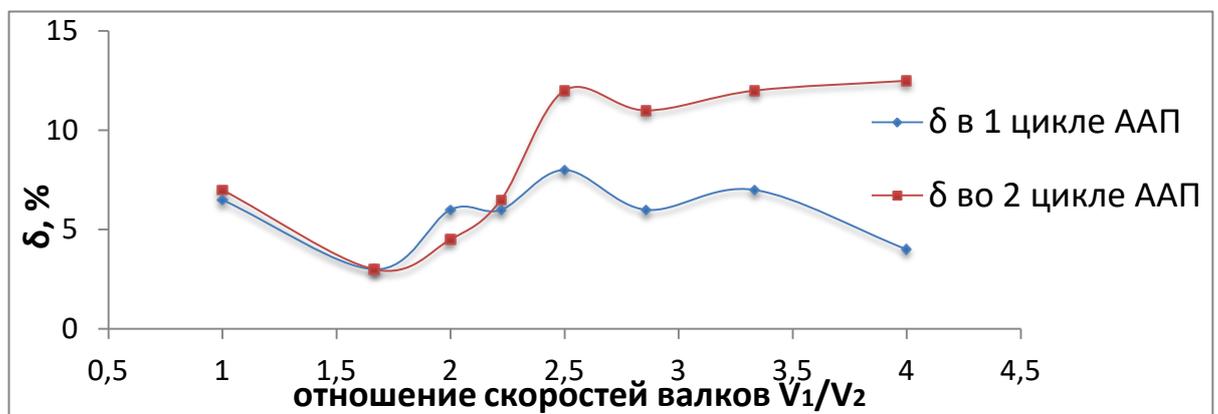


Рисунок 3.14 – Зависимость значений относительного удлинения δ в первом и втором цикле асимметричной аккумулярующей прокатки (ААП) от отношения скоростей валков

Как в первом, так и во втором цикле асимметричной аккумуляющей прокатки значения предела текучести σ_T и предела прочности σ_B снижаются при увеличении отношения скоростей валков. Значение относительного сужения δ в первом цикле имеет низкие значения (от 3% до 7%), во втором цикле при отношении скоростей валков 2,5 – 4 оно возрастает в среднем практически в 2 раза (до 12% максимально), а при отношении скоростей валков 1 – 2,22 почти не изменяется. Объясняется это тем, что при увеличении отношения скоростей валков, повышается температура деформационного разогрева заготовки в очаге деформации. Благодаря этому также возрастает технологическая пластичность металла, что выражается в большем удлинении (увеличении вытяжки) готового слоистого алюминиевого композита (в каждом последующем эксперименте на 10 – 20 % при увеличении отношения скоростей валков в диапазоне 1 – 4).

На рисунке 3.15 представлена зависимость предела текучести σ_T , временного сопротивления разрыву σ_B и относительного удлинения δ от отношения скоростей валков ($V_1/V_2 = 1 \dots 4$).

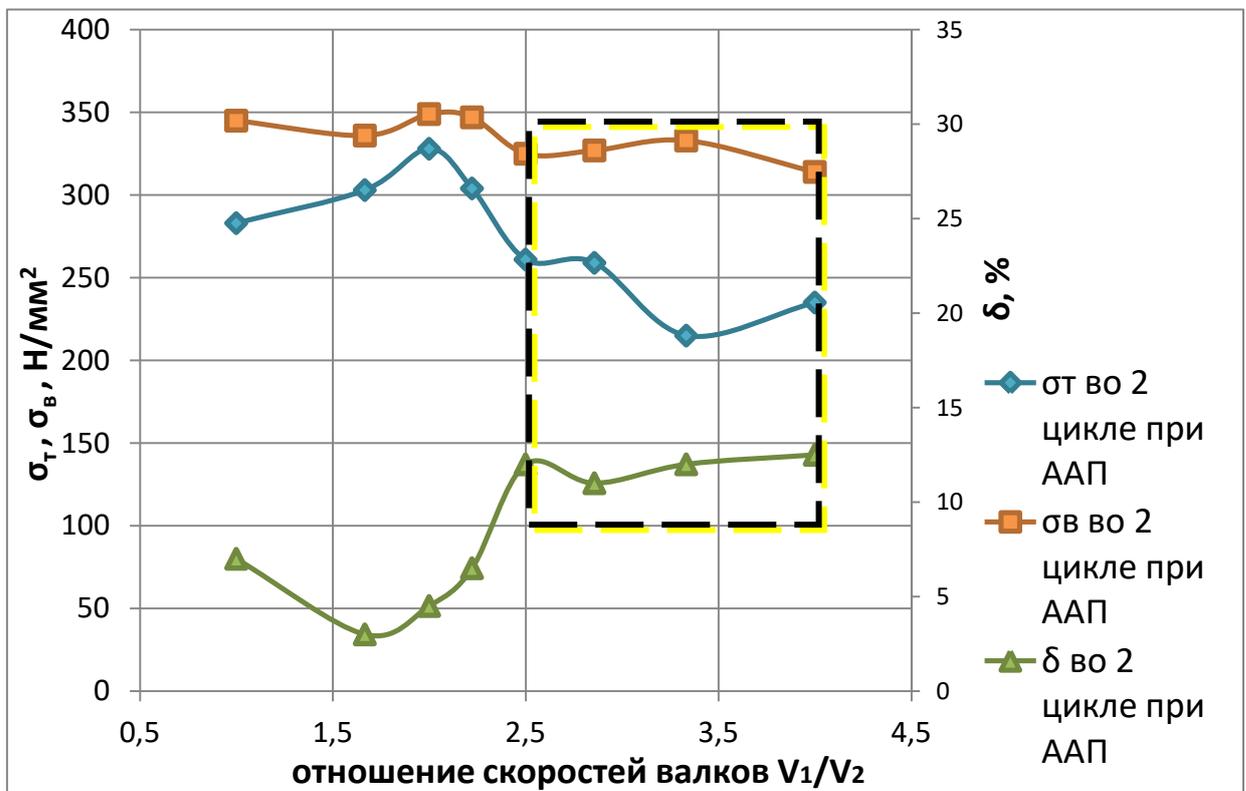
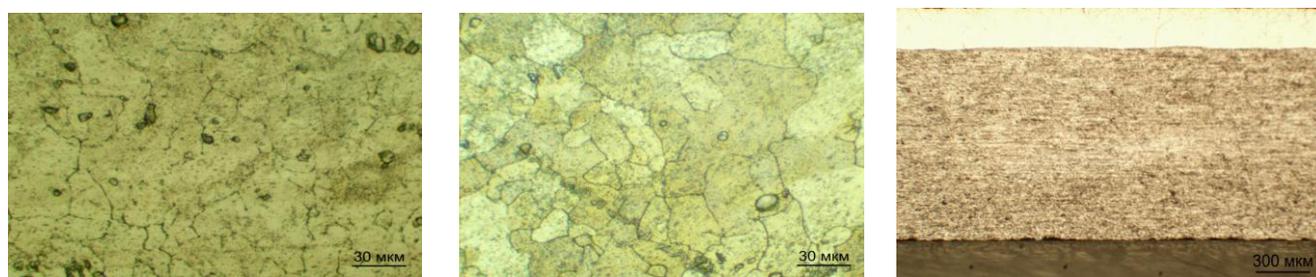


Рисунок 3.15 – Зависимость значений σ_T , σ_B и δ во втором цикле асимметричной аккумуляющей прокатки (ААП) от отношения скоростей валков

Наиболее рациональным значением отношения скоростей валков для асимметричной аккумулярующей прокатки листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 является 3,3 в приемлемом диапазоне от 2,5 до 4. В данном диапазоне увеличивается не только пластическая характеристика относительного удлинения δ , но и разница между значениями предела текучести σ_T и временного сопротивления разрыву σ_B , что говорит об увеличении запаса пластичности и снижения вероятности хрупкого разрушения.

На рисунках 3.16 – 3.18 представлены макро- и микроструктуры листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 после первого цикла асимметричной прокатки и 5083/2024 после второго цикла прокатки.



а

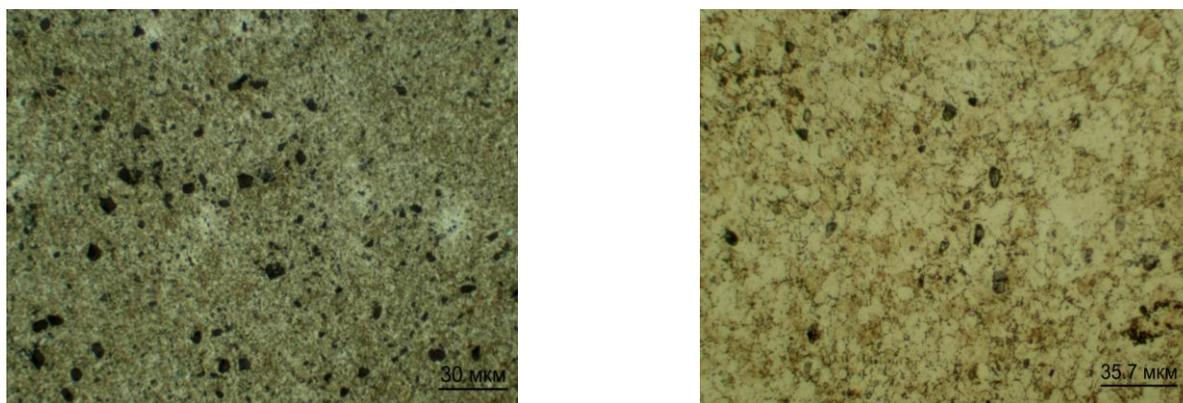
б

в

а – микроструктура, сторона 5083, б – микроструктура, сторона 1070,

в – макроструктура, поперечное сечение образца

Рисунок 3.16 – Структура листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070 после первого цикла асимметричной аккумулярующей прокатки

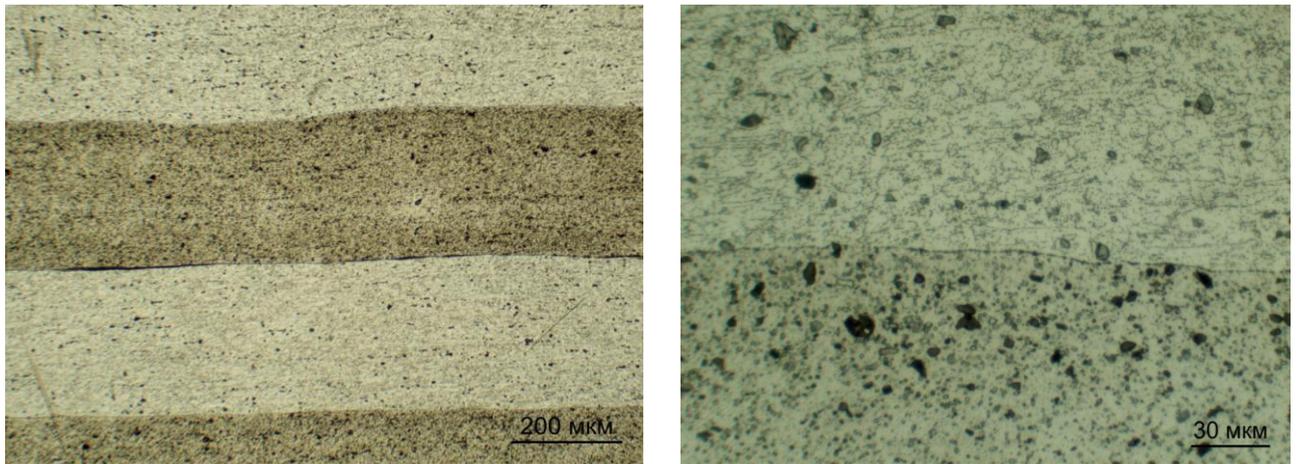


а

б

а – сторона 2024, б – сторона 5083

Рисунок 3.17 – Микроструктура листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 после второго цикла асимметричной аккумулярующей прокатки



а

б

а – макроструктура поперечного сечения образца с послойным расположением сплавов 5083 и 2024, б – микроструктура межслойной границы

Рисунок 3.18 – Структура листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 после второго цикла асимметричной аккумуляющей прокатки

Осуществление пробоподготовки. Образцы размерами 15 мм x 15 мм запрессовывали в форму диаметром 40 мм. Далее образцы заливались в порошок прозрачного бакелита на полуавтоматическом прессе для горячей запрессовки CitoPress-20 (при 180 °С в течение 5 минут при давлении 350 бар). После запрессовки проводилась шлифовка и полировка на шлифовально-полировальном станке (сначала на шкурке шероховатостью 400, после на шкурке шероховатостью 1200 с водным охлаждением, затем на алмазной суспензии и на коллоидном диоксиде кремния). Травление на зерно проводилось в реактиве Келлера (Keller): 95 мл H₂O, 2,5 ml HNO₃, 1,5 ml HCl, 1,0 ml HF. Погружение осуществлялось на 10 – 20 секунд с последующей промывкой дистиллированной водой. Для большего окраса дополнительно подтравливались в реактиве Века (Weck): 100 ml H₂O, KMnO₄, NaOH. Микроскоп для исследования использовался цифровой металлографический инвертированный (Альтами МЕТ 1Д), установленном в УрО РАН.

По результатам проведенной микроскопии очевидно, что после первого цикла асимметричной аккумуляющей прокатки не удается получить мелкозернистую структуру, значения механических свойств также будут

неудовлетворительными (на примере листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070). После второго цикла обработки достигается ультрамелкозернистая структура в одном из слоёв композита (размер зерна в сплаве 2024 составляет около 1 мкм за исключением интерметаллических включений на примере листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024), второй слой характеризуется мелкозернистой структурой (размер зерна в сплаве 5083 составляет около 5 мкм). Распределение слоёв относительно друг друга соответствуют ранее рассчитанной компьютерной модели, соединение слоев прочное.

3.5 Выводы по главе 3

1) Проведенные эксперименты по симметричному и асимметричному деформированию слоистых образцов из алюминиевых композитов 5083/5083 и 6061/6061 на стане 400 асимметричной прокатки лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», позволили исключить способ симметричной прокатки как метод обработки листовых слоистых алюминиевых композитов.

2) Проведены эксперименты по асимметричной аккумулялирующей прокатке слоистых образцов из алюминиевых композитов 5083/1070, 5083/2024, 6061/1070 и 6061/2024 на стане 400 асимметричной прокатки лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Выявлены режимы обработки данных листовых слоистых алюминиевых композитов, включающие в себя такие параметры как: вид материала, общая толщина заготовки и толщина каждого отдельного слоя, температура нагрева перед прокаткой и время выдержки, величина отношения скоростей валков, обжатие, коэффициент трения, количество требуемых циклов.

3) Результаты экспериментов показали, что процесс симметричной прокатки алюминиевых листовых слоистых композитов 5083/5083 и 6061/6061 характеризуется образованием продольных разрывов уже после первого цикла обработки при обжатии 42%. Кроме того не происходит процесс сварки

давлением. При симметричной прокатке листовых слоистых алюминиевых композитов состоящих из разнородных металлов, процесс сварки давлением проходит, но только при тёплой прокатке. Кроме того, для получения требуемых свойств в симметричном случае требуется провести большее количество циклов по сравнению с асимметричными случаями.

4) Для листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070, 6061/1070 и 5083/2024, 6061/2024, требуется проведение предварительного нагрева перед процессом асимметричного деформирования – прокатка для данных образцов должна осуществляться тёплой.

5) В зависимости от вида листового слоистого алюминиевого композита время выдержки металла в печи при температуре 380° С отличалось. Для листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 время нахождения металла в печи должно составлять не менее 8 минут, но не более 15 минут. Для листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070 не менее 5 и не более 8 минут;

6) Выявлена необходимость контроля деформационного разогрева в очаге деформации при прокатке во избежание плавления материала в клетки или налипания его на валки (отношение скоростей валков не должно превышать 4). Важно соблюдать пределы температур нагрева заготовок перед прокаткой (в случае тёплой прокатки) в зависимости от марочного состава листового слоистого алюминиевого композита;

7) Найдены границы областей соотношений суммарной эквивалентной деформации и угла сдвига для листовых слоистых алюминиевых композитов (5083/1070, 5083/2024) при попадании в которые гарантированно обеспечивается получение высоких значений прочности (не менее 300МПа) и технологической пластичности (увеличение коэффициента вытяжки в 5 раз) в каждом из слоев и переходном слое. Значение эквивалентной деформации должно быть не менее 3, угол сдвига – не менее 70°.

8) Следует исключить из предлагаемых вариантов листовые слоистые алюминиевые композиты 6061/1070 и 6061/2024 из-за низких значений механических свойств;

9) Наиболее рациональные значения отношений скоростей валков составляют 2,5 – 4 раза для заготовок с исходной толщиной слоёв 1 – 2 мм, т.к. они обеспечивают максимальные отношения временного сопротивления разрыву σ_b к пределу текучести σ_T (1,55) и относительное удлинение δ (12%), а также прямолинейное движение металла на выходе из очага деформации.

10) Показано, что с увеличением отношения скоростей рабочих валков с 1 до 4 для листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 усилие прокатки снижается с 1330 кН до 600 кН при одновременном повышении относительного обжатия с 37% до 67%. Отношение скоростей валков 5 характеризуется плавлением листового слоистого алюминиевого композита в очаге деформации.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ И НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АСИММЕТРИЧНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛИСТОВЫХ СЛОИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ

По результатам численного и экспериментального исследований, приведенных в главах 2 и 3, показана целесообразность получения листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024. В то же время, использование листовых слоистых алюминиевых композитов 6061/1070, 6061/2024 нецелесообразно.

Технологические схемы были разработаны как для производства рулонных, так и листовых слоистых алюминиевых композитов. Для рулонной продукции предлагается использовать листовые слоистые алюминиевые композиты 5083/1070, а для листовой как 5083/2024, так и 5083/1070, что будет зависеть от назначения и требований потребителя. Общая схема приведена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Общая схема производства листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024

4.1 Рациональные технологические режимы для обработки листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070

По результатам исследований предлагаются следующие технологические режимы асимметричного деформирования листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070:

1) В качестве материала использовать алюминиевые сплавы 1070 и 5083, из которых составляется листовый слоистый алюминиевый композит 5083/1070;

2) Общая толщина исходного листового слоистого алюминиевого композита может варьироваться от 2 мм до 4 мм;

3) Толщина каждого отдельного слоя листового слоистого алюминиевого композита может варьироваться от 1 мм до 2 мм;

4) Обжатие в первом цикле прокатки $\varepsilon = 50 - 67 \%$;

5) Обжатие во втором цикле прокатки $\varepsilon = 50 - 67 \%$;

6) Радиус рабочих валков 170 – 250 мм;

7) Значение отношения скоростей установить не менее 1,25 для заготовок толщиной 2 мм при обжатии 50 – 57%; не менее 1,7 для заготовок толщиной 2 мм при обжатии 58 – 67%; не менее 1,7 для заготовок толщиной 3 мм при обжатии 50 – 57%; не менее 2 для заготовок толщиной 3 мм при обжатии 58 – 67%; не менее 2 для заготовок толщиной 4 мм при обжатии 50 – 57%; не менее 2,5 для заготовок толщиной 4 мм при обжатии 58 – 67%;

8) Коэффициент трения f минимально принять 0,2, получаемый путём предварительной прокатки алюминиевых листов;

9) Предварительно подготавливать поверхность металлов перед соединением зачисткой металлическими щётками и обезжириванием при холодном деформировании;

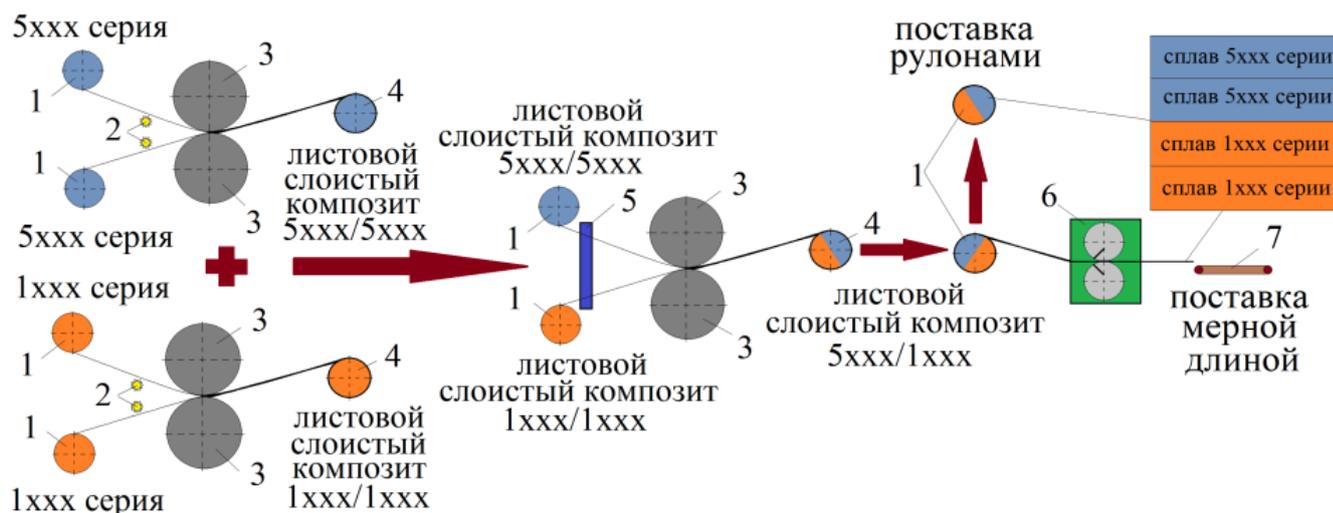
10) Температура нагрева в печи при тёплом деформировании – 380° С;

11) Время выдержки в печи перед процессом теплой прокатки для листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070 – 5 – 8 минут;

12) Минимальное количество проходов – 2.

При данных параметрах прокатки в представленных композитах будут появляться большие сдвиговые деформации, поэтому такое асимметричное деформирование будет способствовать повышению технологической пластичности и прочности. При этом температура деформационного разогрева не достигнет критического значения температуры.

Предлагаемая схема технологического процесса представлена на рисунке 4.2.



1 – разматыватели; 2 – щётки; 3 – валки; 4 – моталка; 5 – печь;

6 – ножницы; 7 – транспортер листов

Рисунок 4.2 – Технологическая схема процесса производства алюминиевых листовых слоистых композитов (на примере 5xxx и 1xxx серий)

Предлагаемая технологическая схема включает в себя несколько этапов:

1 Проведение первого цикла асимметричной аккумулярующей прокатки при использовании алюминиевых сплавов 5xxx серии с предварительной зачисткой поверхности металлическими щётками и осуществлением сварки полос давлением с последующей смоткой в рулон;

2 Проведение первого цикла асимметричной аккумулярующей прокатки при использовании алюминиевых сплавов 1xxx серии с предварительной зачисткой поверхности металлическими щётками и осуществлением сварки полос давлением с последующей смоткой в рулон;

3 Проведение второго цикла асимметричной аккумулярующей прокатки при использовании алюминиевых слоистых композитов 1xxx и 5xxx серий,

полученных после первого цикла прокатки, с предварительным нагревом металла в печи при температуре 380°C в течение 5 – 8 минут и осуществлением сварки полос давлением с последующей смоткой в рулон;

4 Порезка слоистого композита 5xxx/1xxx для получения мерной длины при необходимости (алюминиевого листового слоистого композита 5xxx/1xxx).

В зависимости от требуемых свойств количество циклов может варьироваться.

4.2 Рациональные технологические режимы для обработки листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/2024

По результатам исследований предлагаются следующие технологические режимы асимметричного деформирования листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024:

1) В качестве материала использовать алюминиевые сплавы 2024 и 5083, из которых составляется листовый слоистый алюминиевый композит 5083/2024;

2) Общая толщина исходного листового слоистого алюминиевого композита может варьироваться от 2 мм до 4 мм;

3) Толщина каждого отдельного слоя листового слоистого алюминиевого композита может варьироваться от 1 мм до 2 мм;

4) Обжатие в первом цикле прокатки $\varepsilon = 50 - 65 \%$;

5) Обжатие во втором цикле прокатки $\varepsilon = 50 - 60 \%$;

6) Радиус рабочих валков 170 – 250 мм;

7) Значение отношения скоростей установить не менее 1,7 для заготовок толщиной 2 мм при обжатии 50 – 56%; не менее 2 для заготовок толщиной 2 мм при обжатии 57 – 65%; не менее 2 для заготовок толщиной 3 мм при обжатии 50 – 56%; не менее 2,5 для заготовок толщиной 3 мм при обжатии 57 – 65%; не менее 2,5 для заготовок толщиной 4 мм при обжатии 50 – 56%; не менее 3,3 для заготовок толщиной 4 мм при обжатии 57 – 65%;

8) Коэффициент трения f минимально принять 0,3, получаемый путём предварительной прокатки алюминиевых листов;

9) Температура нагрева в печи при тёплом деформировании – 380° С;

10) Время выдержки в печи перед процессом теплой прокатки для сплавов 2024 и 5083 – 15 минут перед первым циклом, 8 – 10 минут перед вторым циклом;

11) Минимальное количество проходов – 2.

Как и в предыдущем случае, при данных параметрах прокатки в представленных композитах будут появляться большие сдвиговые деформации, поэтому асимметричная аккумулярирующая прокатка позволит получить высокие значения прочности и технологической пластичности. При этом температура деформационного разогрева не достигнет критической температуры. Предлагаемая технологическая схема включает в себя несколько этапов:

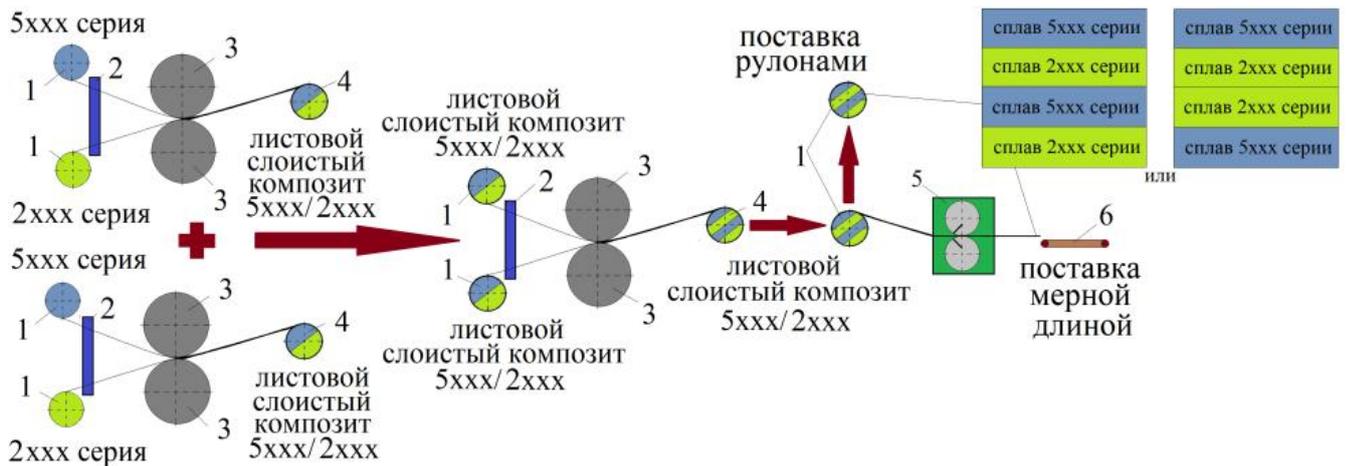
1 Проведение первого цикла асимметричной аккумулярирующей прокатки (дважды) при использовании алюминиевых сплавов 5xxx и 2xxx с предварительным нагревом металла в печи при температуре 380° С в течение 15 минут и осуществлением сварки полос давлением с последующей смоткой в рулон;

2 Проведение второго цикла асимметричной аккумулярирующей прокатки при использовании алюминиевых слоистых композитов 5xxx/2xxx, полученных после первого цикла прокатки, с предварительным нагревом металла в печи при температуре 380° С в течение 8 – 10 минут и осуществлением сварки полос давлением с последующей смоткой в рулон;

3 Порезка слоистого композита 5xxx/2xxx для получения мерной длины при необходимости (алюминиевого листового слоистого композита 5xxx/2xxx);

В зависимости от требуемых свойств количество циклов может варьироваться, кроме того возможно изменение компоновки слоёв композита по запросу потребителя.

Предлагаемая схема технологического процесса представлена на рисунке 4.3.



1 – разматыватели; 2 – печь; 3 – валки; 4 – моталка; 5 – ножницы;
6 – транспортер листов

Рисунок 4.3 – Схема технологического процесса производства алюминиевых листовых слоистых композитов (на примере 5xxx и 2xxx серий)

Данная технология справедлива также для листового слоистого композита 5083/1070 (имеющего распределение слоев 5083-1070-5083-1070). В зависимости от требуемых свойств, количество циклов может варьироваться.

4.3 Особенности использования листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024

Листовые слоистые алюминиевые композиты 5083/2024 предназначены для производства габаритных частей кузова легкового автомобиля (капот, крылья, крыша, двери, днище).

В настоящее время в качестве конструкционного материала для автомобилестроения используются однослойные алюминиевые сплавы 5xxx и бxxx серий (например, 5182, 6016 и т.д., изготавливаемые по ГОСТ 21631-76, ГОСТ 4784-97, EN 515, EN 573-3, EN 485-1,2,4 и т.д.), которые постепенно приходят на смену стальным материалам.

Однако алюминиевые сплавы, применяемые в автомобилестроении, не обладают высокими значениями прочностных характеристик. Главная цель замены существующей алюминиевой продукции на листовую слоистый алюминиевый композит 5083/2024 заключается в первую очередь в повышении

уровня прочностных характеристик. Исходя из этого повысится эксплуатационная безопасность, кроме того при высоком уровне прочностных характеристик снизится вероятность появления небольших повреждений после не крупных аварий. Сочетание 5xxx и 2xxx серии позволит получить удовлетворительное качество поверхности за счёт сплава 5083, сплав 2024 может применяться в конструкциях, в которых требуется высокое значение коэффициента вязкостного разрушения, более того в совокупности они лучше выдерживают эксплуатационные нагрузки [2]. Толщина производимой продукции составит 0,7–1,5 мм, ширина не более 1800 мм.

В таблице 4.1 представлены характеристики исходных материалов (сплавов 5083 и 2024), а также полученного листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024.

Таблица 4.1 – Сравнительные характеристики сплавов 2024, 5083 с полученным листовым слоистым алюминиевым композитом 5083/2024

Сплав	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	НВ, ед
5083	140	280	16	65
2024	120	235	9	42
5083/2024	215	333	12	130 / 106

Ниже, в таблице 4.2, приведены сравнительные характеристики существующих и предлагаемых материалов. Все металлы были испытаны на разрывной машине Shimadzu Servopulser U-type. Испытания проводились по ГОСТ 11701-84. Испытывалось не менее 10 образцов с одинаковыми начальными и граничными условиями обработки.

Таблица 4.2 – Сравнительные характеристики однослойных алюминиевых сплавов и листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 толщиной 1 мм

Марка	НД	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	НВ, ед
5182	EN 485-2:1993	80	175	15	70
6016	EN 485-2:1993	90	160	15	50
5083/2024	-	215	333	12	сторона 5083: 130 сторона 2024: 106

Листовые слоистые алюминиевые композиты 5083/1070 предназначены для использования в космической отрасли, а именно для производства топливных баков ракет носителей и космических кораблей для окислителя и горючего сжиженного водородного топлива.

Сейчас в качестве основных материалов для производства корпусов топливных баков ракет носителей используются алюминиевые сплавы легированные либо магнием, либо литием (например, чаще всего АМг5, АМг6 или 1201, 1421, 1469, 8090 в некоторых конструкциях и т.д.). Данная продукция изготавливается по ГОСТ 21631-76, ГОСТ 4784-97, EN 515, EN 573-3, EN 485-1,2,4. Толщина топливных баков, в зависимости от вида ракеты носителя или космического корабля, может варьироваться от 0,4 до 2,5 мм, ширина поставляемой продукции зависит от формируемого диаметра бака и не превышает 2000 мм. Предлагаемые толщины бака составляют 0,7 – 1,5 мм.

Известно, что в России ведется разработка двигателей для ракет носителей и космических кораблей, работающих на водородном топливе. Однако существующие материалы, из которых изготавливается корпус бака, достаточно сильно подвергаются водородной коррозии. Это отражается на стойкости агрегатов хранения, взрывоопасности объектов из-за их охрупчивания водородом. Сочетание 5xxx и 1xxx серий позволит с одной стороны получить достаточный уровень прочности (соответствующий установленной нормативной документацией), с другой стороны позволит использовать водородное топливо в качестве горючего, так как алюминиевые сплавы 1xxx серии (в данном случае сплав 1070) практически не подвергаются коррозии при взаимодействии с водородом.

В таблице 4.3 также представлены характеристики исходных материалов (сплавов 5083 и 1070), и полученного листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070. Листовой слоистый алюминиевый композит представлен в двух вариантах – без заключительной термической обработки (5083/1070) и с применением отжига при температуре 240°С в течение 20 минут (5083/1070М).

Таблица 4.3 – Сравнительные характеристики сплавов 1070, 5083 с полученным листовым слоистым алюминиевым композитом 5083/1070

Сплав	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	НВ, ед
5083	140	280	16	65
1070	-	60	20	25
5083/1070	210	304	10	132 / 65
5083/1070М	180	280	15	106 / 45

Сравнение значений механических свойств, полученных после асимметричной аккумулярующей прокатки и применяемых на сегодняшний день однослойных алюминиевых сплавов, представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Сравнительные характеристики однослойных алюминиевых сплавов и листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070 толщиной 1 мм

Марка	НД	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	НВ, ед
АМг5	ГОСТ 21631-76	145	275	15	65
АМг6	ГОСТ 21631-76	155	310	15	65
5083/1070	-	210	304	10	сторона 5083: 132 сторона 1070: 65
5083/1070М	-	180	280	15	сторона 5083: 106 сторона 1070: 45

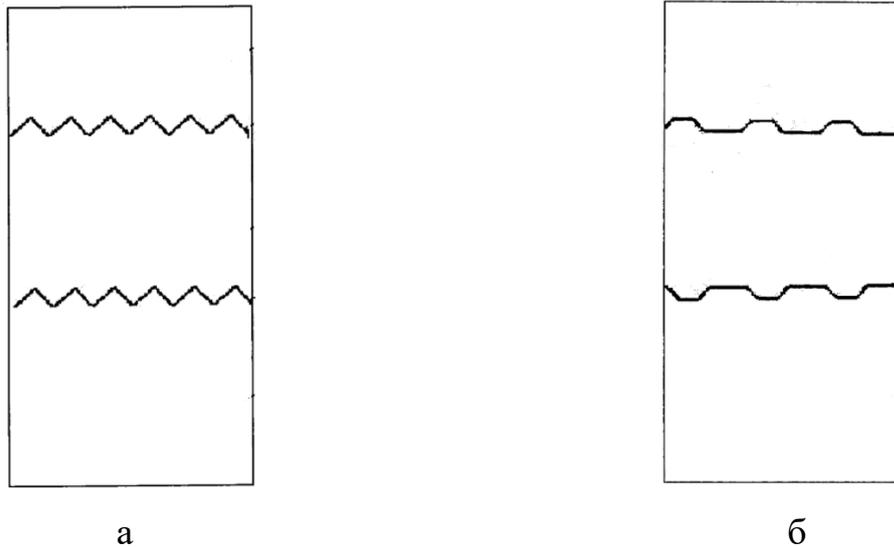
Полученные результаты указывают на то, что предлагаемые технологические схемы асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/2024 и 5083/1070 позволяют обеспечить достижение одновременно высоких прочности и технологической пластичности листовых слоистых алюминиевых композитов за счет создания больших сдвиговых деформаций [215 – 218].

Разработанные технологические схемы производства листовых слоистых алюминиевых композитов на стане асимметричной прокатки приняты к использованию в ООО «ЧерметИнформСистемы», Институте информационных технологий, дизайна и производства (г. Джабалпур, Индия). Представленная совокупность технических и технологических разработок внедрена в учебный процесс ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»

4.4 Разработка новых технических решений

Исходя из разработанных технологических схем, был предложен ряд технических решений. Одно из таких решений заключается в проведении процесса холодной прокатки с отношением скоростей валков, которое зависит от исходной и конечной толщины материала, диаметров валков и эмпирического коэффициента ($k = 0,95 - 0,98$). При этом шероховатость валков также будет отличаться, единичная степень деформации должна составлять не менее 50%. По данному техническому решению будет обеспечиваться одновременное повышение прочностных и пластических свойств на 5 – 10% с получением градиентной структуры [219, 220].

Еще два предложения касаются применения предварительной механической обработки поверхности одного из слоёв биметалла или слоистого материала с формированием рельефа с заданным профилем в поперечном направлении к оси прокатки. Данное решение поможет исключить смещение слоев относительно друг друга в очаге деформации, частичное сваривание и заворот передней части заготовки по типу дефекта «серповидность», улучшит плотность соединения между сплавами. Прокатка должна осуществляться с обжатием 65-80% за один проход с применением термообработки. В процессе термообработки осуществляют данную механическую обработку необработанных контактирующих друг с другом поверхностей заготовок. При этом на соединяемых поверхностях формируется трапециевидный или зубчатый рельефы, указанные на рисунке 4.4 [221, 222].



а – зубчатый рельеф, б – трапециевидный рельеф

Рисунок 4.4 – Виды формируемого рельефа при обработке металла
новым способом

Предложенные технические решения позволяют получать высокий уровень сдвиговой деформации в металлах, что приведет к повышению значений механических свойств.

4.5 Выводы по главе 4

1) Разработаны рациональные технологические режимы для обработки листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024, включающие схемы технологического процесса производства мерной длины и рулонов. Данные режимы предполагают установку основных параметров процесса асимметричной аккумуляющей прокатки, в том числе определенные марки, используемые для производства листовых слоистых алюминиевых композитов (1070, 2024 и 5083), толщины исходных заготовок (от 2 мм до 4 мм), обжатия в первом и во втором цикле (от 50% до 67%), значения отношения скоростей валков (в диапазоне 1,25 – 4), предварительную подготовку поверхности заготовок и валков, режимы термической обработки (зависит от вида листового слоистого алюминиевого композита) и количество циклов;

2) Показаны возможности замены современных алюминиевых сплавов для автомобилестроения (5182, 6016) новым листовым слоистым алюминиевым

композитом (5083/2024) обладающим повышенными механическими характеристиками (прочностью и твёрдостью);

3) Показаны возможности замены алюминиевых сплавов для космостроения (АМг5, АМг6, 8090) новым листовым слоистым алюминиевым композитом (5083/1070), позволяющим использовать водородное топливо;

4) Предложены новые технические решения по использованию асимметричной и специальной прокатки с формированием двух типов рельефов путём механической обработки.

5) Указано, что разработанные технические решения, схемы производства рассматриваемых листовых слоистых алюминиевых композитов методом асимметричной аккумулялирующей прокатки приняты к использованию в ООО «ЧерметИнформСистемы», Институте информационных технологий, дизайна и производства (г. Джабалпур, Индия) и в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»;

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе рассмотрены возможности замены существующих однослойных материалов из алюминиевых сплавов, используемых в автомобилестроении и космической отрасли, на листовые слоистые алюминиевые композиты 5083/1070 и 5083/2024. Данная замена обеспечит повышение механических и эксплуатационных свойств продукции. Для осуществления замены были разработаны технологические схемы производства листовых слоистых алюминиевых композитов способом асимметричной аккумулярующей прокатки, поставляемых либо в виде рулонов, либо мерной длины. Толщины листов составят 0,7 – 1,5 мм, ширина готовой продукции – не более 1800 мм.

В рамках диссертационной работы проведен ряд исследований, направленных на развитие теории, технологии и апробацию в лабораторных условиях получения листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024 методом асимметричной аккумулярующей прокатки:

1. Разработаны компьютерные модели, выполнены численные исследования в программных комплексах «DEFORM 2D/3D» и «QFORM 2D/3D» процессов асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070, 5083/2024, 6061/1070, 6061/2024 в широком диапазоне отношений скоростей рабочих валков от 1 до 5, позволившие:

- определить необходимые границы областей ($\epsilon > 3$, $\varphi > 70^\circ$) гарантированного одновременного повышения прочности (σ_B не менее 300 МПа) и технологической пластичности (с ростом коэффициента вытяжки до 5,5), для достижения которых необходимо провести не менее 2 циклов обработки;

- найти диапазон отношений скоростей рабочих валков ($V_1/V_2 = 2,5 \dots 4$), обеспечивающий максимальные относительное удлинение δ (12%) и отношение временного сопротивления разрыву σ_B к пределу текучести σ_T (1,55), а также прямолинейное движение металла на выходе из очага деформации.

2. Экспериментально установлено существенное увеличение технологической пластичности и снижение усилия прокатки в процессах

асимметричной аккумулярующей прокатки по сравнению с прокаткой с одинаковыми скоростями рабочих валков:

- при холодной асимметричной аккумулярующей прокатке для листового слоистого алюминиевого композита 5083/5083 увеличение отношения скоростей рабочих валков до 1,9 приводило к одновременному увеличению суммарного относительного обжатия до 77,5% без разрушения металла и снижению усилия прокатки до 490 кН по сравнению с симметричным случаем, при котором образец разрушился при относительном обжатии 42% и усилии 912 кН;

- при тёплой асимметричной аккумулярующей прокатке (температура нагрева 380°C) листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 увеличение отношения скоростей рабочих валков от 1 до 4 приводит к повышению относительного обжатия с 37% до 67% при одновременном снижении усилия прокатки с 1330 кН до 600 кН.

3. Найдены зависимости распределений слоёв в листовых слоистых алюминиевых композитах 5083/2024 и 5083/1070 по длине очага деформации при обжатии 50% и соотношении скоростей рабочих валков от 1 до 2 при асимметричной аккумулярующей прокатке, причём максимальная глубина внедрения слоя 5083 в композите 5083/2024 составляет 0,21 мкм, а максимальная глубина внедрения слоя 1070 в композите 5083/1070 – 0,15 мкм.

4. Разработан ряд новых технических и технологических решений:

- предложены новые технические решения (патенты РФ № 2699473, № 2762696, № 2756086 и евразийский патент № 039071), заключающиеся в формировании трапециевидного или зубчатого рельефа для исключения смещения слоёв относительно друг друга в очаге деформации и улучшения прочности соединения, а также в задании соотношения скоростей рабочих валков в зависимости от толщин материалов и шероховатости валков;

- разработаны технологические схемы производства листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 (для топливных баков ракет носителей) и 5083/2024 (для габаритных частей кузова автомобиля).

5. Разработанные технические решения и технологические схемы производства листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024 приняты к использованию в ООО «ЧерметИнформСистемы», Институте информационных технологий, дизайна и производства (г. Джабалпур, Индия). Представленная совокупность технических и технологических разработок внедрена в учебный процесс ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евсеенко, Е.А., Определение оптимального расположения топливных баков ракеты, спроектированной по схеме «тандем», из условия минимума стартовой массы / Е.А. Евсеенко, Н.Н. Генералов // МГТУ им. Н.Э. Баумана, Инженерный журнал: наука и инновации. – 2016. – №1. – С. 1 – 19.
2. Гуреева, М.А. Алюминиевые сплавы в сварных конструкциях современных транспортных средств / М.А. Гуреева, О.Е. Грушко // Машиностроение и инженерное образование. – 2009. – №1. – С. 27 – 41.
3. Sudha, G.T. Mechanical Properties, Characterization and Wear Behavior of Powder Metallurgy Composites - A Review / G.T. Sudha // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 22. – P. 2582 – 2596.
4. Wang, S. Engineering prediction of fatigue strength for copper alloy netting structure by experimental method / S. Wang // Aquacultural Engineering. – 2020. – Vol. 90. – P. 20.
5. Hu, J. Finite element modeling of Conform-HPTE process for a continuous severe plastic deformation path / J. Hu // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 55. – P. 373 – 380.
6. Borodin, E. N. Experimental and numerical analyses of microstructure evolution of Cu-Cr-Zr alloys during severe plastic deformation / E. N. Borodin // Materials Characterization. – 2019. – Vol. 156. – P. 80.
7. Liao, Z. Grain refinement mechanism of nickel-based superalloy by severe plastic deformation - Mechanical machining case / Z. Liao // Acta Materialia. – 2019. – Vol. 180. – P. 2 – 14.
8. Mineta, T. Simultaneously improved mechanical properties and corrosion resistance of Mg-Li-Al alloy produced by severe plastic deformation / T. Mineta // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Vol. 735. – P. 418 – 422.
9. Jiang, S. Mechanisms of nanocrystallization and amorphization of NiTiNb shape memory alloy subjected to severe plastic deformation / S. Jiang // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 207. – P. 1493 – 1498.

10. Lipińska, M. The influence of severe plastic deformation processes on electrical conductivity of commercially pure aluminium and 5483 aluminium alloy / M. Lipińska // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 16. – P. 717 – 723.

11. Stepanova, E. Structure and Mechanical Properties of a Zr-1Nb Alloy, Obtained by the Method of Severe Plastic Deformation / E. Stepanova // Materials Today: Proceedings. – 2015. – Vol. 2. – P. 365 – 369.

12. Romankov, S. Formation of nanolaminated amorphous/crystalline structure in the multicomponent system under severe plastic deformation / S. Romankov // Materials Letters. – 2012. – Vol. 85. – P. 109 – 112.

13. Toth, L. Ultrafine-grain metals by severe plastic deformation / L. Toth // Materials Characterization. – 2014. – Vol. 92. – P. 1 – 14.

14. Ren, J. Fine surface microstructure of Fe₃Al alloy after severe plastic deformation / J. Ren // Materials Letters. – 2016. – Vol. 171. – P. 133 – 136.

15. Tolmachev, T. On the Structural Features of Mechanically Alloyed Cu-Ag and Au-Co by Severe Cold and Cryogenic Plastic Deformation / T. Tolmachev // Physics Procedia. – 2016. – Vol. 84. – P. 349 – 354.

16. Govindaraju, M. Effect of Severe Plastic Deformation and Heat Treatment on Toughness of Magnesium Alloys / M. Govindaraju // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 6. – P. 37 – 42.

17. Hohenwarter, A. Incremental high pressure torsion as a novel severe plastic deformation process: Processing features and application to copper / A. Hohenwarter // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 626. – P. 80 – 85.

18. Changizian, P. Flow localization during severe plastic deformation of AZ81 magnesium alloy: Micro-shear banding phenomenon / P. Changizian // Materials Science and Engineering: A. – 2013. – Vol. 582. – P. 8 – 14.

19. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства : учебное пособие / Р.З. Валиев, И.В. Александров – Москва : ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.

20. Маркушев, М.В. К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов : учебное пособие / М.В. Маркушев – Уфа : Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, 2011. – 43с.

21. Valiev, R.Z. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation / R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov // Prog. Mateial Science. – 2000. – Vol. 5. – P. 103 – 189.

22. Малышева, С. П. Влияние холодной прокатки на структуру и механические свойства листов из технического титана / С. П. Малышева, Г. А. Салищев, Е. Б. Якушина // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2008. - №4. - С. 34-40.

23. Asaro, R.J. Deformation Mechanisms and Manufacturing of Nanostructured Materials Processed by Severe Plastic Deformation : book / R.J. Asaro, P. Krysl, D. Benson – University of California, San Diego, 2003. – 80 p.

24. Песин, А.М. Развитие теории и технологии процесса асимметричной тонколистовой прокатки как метода интенсивной пластической деформации : монография / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, М.К. Свердлик – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017. – 151 с.

25. Аркулис, Г.Э. Методика графического анализа пластической деформации n-слойных тел / Г.Э. Аркулис // Известия вузов, Черная металлургия. – 1960.

26. Бояршинов, М.И. Средние удельные давления на валки при прокатке биметалла / М.И. Бояршинов // Научные труды Магнитогорского горно-металлургического института. Металлургиздат. – 1958.

27. Бринза, В.Н. Исследование деформации биметалла титан-сталь при прокатке / В.Н. Бринза, Павлов И.М. // Цветные металлы. – 1961.

28. Волобуев, С.А. Влияние напряженно-деформированного состояния на изменение структуры и свойств биметалла титан ВТ 1-0 + сталь 12Х18Н10Т / С.А. Волобуев, Ю.П. Трыков, В.Н. Арисова, А.Ф. Трудов // Прогрессивные методы получения и обработки конструкционных материалов и покрытий: Сборник трудов Международной научно-технической конференции. – 1997. – С.111-112.

29. Громов, Н.П. Исследование изгиба биметаллических полос при прокатке / Н.П. Громов, В.Г. Синицин // Труды ЦНИИ ЧМ и Института прецизионных сплавов. – 1959. – №23.

30. Гун, Г.С. Расчет усилий и деформаций при обжатии слоистых тел / Г.С. Гун, П.И. Полухин, В.А. Мастеров, Ю.В. Кнышев // Известия вузов. Черная металлургия. – 1962.

31. Гуревич, Л.М. Влияние температуры нагрева на диффузионные процессы в титаново-алюминиевом композите / Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков, Д.Н. Гурулев // Металловедение и прочность материалов: Межвузовский сборник научных трудов. – 2001. – С. 3–10.

32. Долженков, Ф.Е. Исследование прокатки биметалла сталь-титан в вакууме / Ф.Е. Долженков, Ю.И. Кривонос // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1964. – № 11. – С.48–50.

33. Засуха, П.Ф. Биметаллический прокат : учебное пособие / П.Ф. Засуха, В.Д. Корщиков, О.Б. Бухвалов, А.А. Ершов // Москва : Металлургиздат, 1970. – 263 с.

34. Кобелев, А.Г. Технология слоистых металлов : учебное пособие / А.Г. Кобелев, И.Н. Потапов, Е.В. Кузнецов // Москва : Металлургия, 1991. – 278 с.

35. Король, В. К. Основы технологии производства многослойных металлов : учебное пособие / В. К. Король, М. С. Гильденгорн. – Москва: Металлургия, 1970. – 238 с.

36. Полухин, П.И. Прокатное производство : учебное пособие / П.И. Полухин, Н.М. Федосов, А.А. Королёв, Ю.М. Матвеев – Москва : Металлургиздат, 1960. – 540 с.

37. Проничев, Д.В. Исследование коррозионной стойкости биметалла АД1+Ст3 / Д. В. Проничев, Л. М. Гуревич, М. Д. Трунов, В. М. Ястребов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015.

38. Стеблянка, В.Л. Моделирование формоизменения биметаллического профиля при прокатке в четырехвалковом стрельчатом калибре / В.Л. Стеблянка,

Л.А. Литичевская, В.М. Литичевский // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. 1999. – №3. – С. 34-37.

39. Трыков, Ю.П. Исследование влияния холодной прокатки на структуру и свойства околосшовной зоны биметалла медь-алюминий, полученного сваркой взрывом // Производство проката. – 2002 – С.35–39.

40. Шморгун, В.Г. Определение местной деформации при сварке взрывом / В.Г. Шморгун, В.С. Седых, А.П. Соннов // Известия вузов, Чёрная металлургия. 1984 –136 с.

41. Блинов, В.С. Совершенствование технологии холодного плакирования стальной ленты металлизацией поверхности основы: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.03.05 / Блинов Владимир Степанович; Магнитогос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2002. – 18 с.

42. Yu, H. A deformation mechanism of hard metal surrounded by soft metal during roll forming/ Hailiang Yu, A. Kiet Tieu, Cheng Lu // Scientific reports. – 2014. – Vol. 4. – P. 1 – 8.

43. Kawasaki, M. Microstructural evolution in a two-phase alloy processed by high-pressure torsion / M. Kawasaki, B. Ahn, T.G. Langdon // Acta Materialia. – 2010. – Vol. 58. – P. 919 – 930.

44. Langdon, T.G. The development of hardness homogeneity in pure aluminum and aluminum alloy disks processed by high-pressure torsion / T.G. Langdon, M. Kawasaki, S.N. Alhajeri, C. Xu / Materials Science and Engineering. – 2011. – Vol. 529. – P. 345 – 351.

45. Iwahashi, Y. Structural evolution and the Hall-Petch relationship in an Al-Mg-Li-Zr alloy with ultra-fine grain size / Furukawa M., Iwahashi Y., Horita Z., Nemoto M., Tsenev N.K., Valiev R.Z., Langdon T.G. // Acta Materialia. – 1997. – Vol. 45. – P. 4751 – 4762.

46. Tieu, K. Microstructure and mechanical properties of large-volume gradient-structure aluminium sheets fabricated by cyclic skin-pass rolling / K. Tieu, Yu H., Lu C., Li H. // Philosophical magazine. – 2019. –P. 1 – 19.

47. Lu, C. Special rolling techniques for improvement of mechanical properties of ultrafine-grained metal sheets: A review / C. Lu, H.L. Yu, K. Tieu, H.J. Li // *Adv. Eng. Mater.* – 2016. – Vol. 18. – P. 754 – 769.
48. Lu, C. High strength and ductility of ultrathin laminate foils using accumulative roll bonding and asymmetric rolling / C. Lu, H. Yu, K. Tieu, S. Hadi, A. Godbole, C. Kong // *Metall. Mater. Trans.* . – 2015. – Vol. 46.
49. Lee, Y.G. Spherical nanoindentation creep behavior of nanocrystalline and coarse-grained CoCrFeMnNi high-entropy alloys / Y.G. Lee, M.Y. Seok, Y. Zhao, I.C. Choi, J. He, Z. Lu, J.Y. Suh, U. Ramamurty // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 109. – P. 314 – 322.
50. Lee, S.H. Ultra grain refinement of commercial purity aluminum by a multi-stack ARB process / S.H. Lee, H. Inagaki, H. Utsunomiya, Y. Saito, T. Sakai // *Mater. Trans.* – 2003. – Vol. 44. – P. 1376 – 1381.
51. Wang, J. High tensile ductility in a nanostructured metal / J. Wang, M. Chen, F. Zhou // *Nature*. – 2002. – Vol. 419. – P. 912 – 915.
52. Choi, I.C. Nanomechanical behavior and structural stability of a nanocrystalline CoCrFeNiMn high-entropy alloy processed by high-pressure torsion / I.C. Choi, D.H. Lee, M.Y. Seok, J. He, Z. Lu, J.Y. Suh, M. Kawasaki, T.G. Langdon // *Journal of Materials Research*. – 2015. – Vol. 30. – P. 2804 – 2815.
53. Reihanian, M. Ten Years of Severe Plastic Deformation (SPD) in Iran, Part II: Accumulative Roll Bonding (ARB) / M. Reihanian, N. Pardis, E. Bagherpour // *JMF, Iranian Journal of Materials Forming*. – 2018. – Vol. 5. – P. 1 – 25.
54. Reihanian, M. An overview on severe plastic deformation: research status, techniques classification, microstructure evolution, and applications / M. Reihanian, N. Pardis, E. Bagherpour // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – P. 1647–1694.
55. Saito, Y. Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process / Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai, R.G. Hong // *Scripta Materialia*. – 1998. – Vol. 39. – P. 1221-1227.

56. Naseri, M. Fabrication and characterization of hybrid composite strips with homogeneously dispersed ceramic particles by severe plastic deformation/ M. Naseri, A. Hassani, M. Tajally // *Ceramics International*. – 2015. – Vol. 41. – P. 3952-3960.

57. Alimi, N.M. Corrosion behavior assessment of finely dispersed and highly uniform Al/B₄C/SiC hybrid composite fabricated via accumulative roll bonding process / M.H. Alemi, A. Fattah-alhosseini, M. Naseri // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2016. – Vol. 22. – P. 120-126.

58. Chen, M.C. The evolution of microstructures and mechanical properties during accumulative roll bonding of Al/Mg composite / M.C. Chen, H.C. Hsieh, W.T. Wu // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2006. – Vol. 416. – P. 169-172.

59. Jiang, L. The microstructural design of trimodal aluminum composites / L. Jiang, K. Ma, H. Yang, M. Li, E.J. Lavernia // *JOM*. – 2014. – Vol. 66. – P. 898–908.

60. Tsuji, N. Novel ultra-high straining process for bulk materials development of the accumulative roll-bonding (ARB) process / N. Tsuji, Y. Saito, H. Utsunomiya, T. Sakai // *Acta Mater*. – 1999. – Vol. 47. – P. 579–583.

61. Yang, M. Dynamically reinforced hetero-geneous grain structure prolongs ductility in a medium-entropy alloy with gigapascal yield strength / M. Yang, D. Yan, F. Yuan, P. Jiang, E. Ma // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. – 2018. – Vol. 115. – P. 7224–7229.

62. Fang, T.H. Revealing extraordinary intrinsic tensile plasticity in gradient nano-grained copper / T.H. Fang, W.L. Li, N.R. Tao, K. Lu // *Science*. – 2011. – Vol. 331. – P. 1587–1590.

63. Трыков, Ю.П. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов: монография / Ю.П. Трыков, Л.М. Гуревич, В.Г. Шморгун. М: Metallurgizdat, 2004. – 230 с.

64. Трыков, Ю.П. Деформация слоистых композитов: монография / Ю.П. Трыков, В.Г. Шморгун, Л.М. Гуревич / Волгоград: ВолгГТУ, 2001. – 242 с.

65. Конструкции топливных баков: официальный сайт. – Москва. – Обновляется в течение суток. — URL: <https://thealphacentauri.net/61857-konstrukciya-toplivnyh-bakov> (дата обращения 23.11.2021).

66. Елагин, В.И. Пути развития высокопрочных и жаропрочных конструкционных алюминиевых сплавов в XXI столетии / В.И. Елагин // *Металловедение и термическая обработка металлов.* –2007. – №9. – С. 3–11.

67. Антипов, В.В. Высокопрочные Al-Zn-Mg-Cu-сплавы и легкие Al-Li-сплавы / В.В. Антипов, О.Г. Сенаторова, Е.А. Ткаченко, Р.О. Вахромов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* –2011. – №9. – С. 27-33.

68. Gun, G.S. Metallurgy qualimetry theory design and development / G.S. Gun, G.Sh. Rubin, M.V. Chukin, I.G. Gun, I.Yu. Mezin, A.G. Korchunov // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* – 2013. – №5. – С. 67-69.

69. Закиров, Д.М. Применение логики антонимов для комплексного анализа качества автомобильного крепежа / Д.М. Закиров, Д.С. Осипов, И.Г. Гун, А.В. Сабадаш, С.В. Овчинников, В.В. Майстренко, И.Ю. Мезин // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* – 2010. – №4. – С. 57-62.

70. Гун, И.Г. Комплексная оценка результативности сквозных технологий производства с использованием логики антонимов на примере шаровых пальцев / И.Г. Гун, И.А. Михайловский, Д.С. Осипов, В.В. Сальников // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* – 2005. – №9. – С. 67-71.

71. Чукин, М.В., Исследование физико-механических свойств и структуры высокопрочных многофункциональных сплавов инварного класса нового поколения / М.В. Чукин, Э.М. Голубчик, Г.С. Гун, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, Д.М. Чукин, А.Н. Матушкин // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* –2014. – №1. – С. 43-47.

72. Гун, Г.С. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Г.С. Гун, И.Ю. Мезин, Г.Ш. Рубин, А.А. Минаев // *Вестник*

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2014. – №1. – С. 92-96.

73. Chukin, M.V. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing / M.V. Chukin, A.G. Korchunov, G.S. Gun, M.A. Polyakova, N.V. Koptseva // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. –2013. – №5. – С. 33-35.

74. Kolokoltsev, V.M. Structure features and properties of high-alloy white irons / V.M. Kolokoltsev, E.V. Petrochenko // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. –2013. – №5. – С. 3-8.

75. Песин, А.М. Моделирование температурных полей в очаге деформации при асимметричной прокатке алюминиевых сплавов / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Р.К. Вафин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. –2015. – №4. – С. 75-81.

76. Pesin A.M. Simulation of the temperature fields in the deformation zone during asymmetric rolling of aluminum alloys / A.M. Pesin, D.O. Pustovoytov, M.K. Sverdlik // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2014. – №1. – С. 71-78.

77. Дубинский, Ф.С. Моделирование температурных полей в очаге деформации при прокатке сортовых профилей / Ф.С. Дубинский, А.В. Выдрин, М.А. Соседкова, П.А. Мальцев // Вестник ЮУрГУ, №9. – 2010. – С. 82-85.

78. Ямбиков, Р.Ш. Анализ экспериментальных данных температуры полосы при холодной прокатке / Р.Ш. Ямбиков, С.В. Слесарев // Современные материалы, техника и технология, №3. – 2019. – с. 39-42

79. Орлов, Г.А. Учет деформационного разогрева при холодной прокатке / Г.А. Орлов, А.Г. Орлов // Известия ВУЗов, Чёрная металлургия. – 2014. – №9. – С. 64–66.

80. Драпкин, Л.Г. Метод расчета усилий и напряжений при конечных деформациях деталей, изготовленных из многослойного металла/ Л.Г. Драпкин // Труды Ленинградского военно-механического института. – 1955.

81. Halmešová, K. Anisotropy of mechanical and thermal properties of AZ31 sheets prepared using the ARB technique / K. Halmešová // 38th Riso International Symposium on Materials Science IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017.

82. Li, Sh. Superplastic Behavioral Characteristics of FineGrained 5A70 Aluminum Alloy / Sh .Li // School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing. – 2019.

83. Nie, J. Fabrication of Al/Mg/Al Composites via Accumulative Roll Bonding and Their Mechanical Properties / Jinfeng Nie, Mingxing Liu, Fang Wang, Yonghao Zhao, Yusheng Li, Yang Cao and Yuntian Zhu // Materials. – 2016. – Vol. 9. – P. 951.

84. Witkin, Z. Al–Mg alloy engineered withbimodal grain size for high strength and increased ductility / Z. Witkin, R. Lee, S. Nutt, and E. Lavenia, Scr. Mater. – 2003. – Vol. 49. – P. 297–302.

85. Zhao, G. Gradient crystalline structure induced by ultrasonic impact-ing and rolling and its effect on fatigue behavior of TC11 titanium alloy / G. Zhao, Y. Liu, // Res. Phys. – 2017. – Vol. 7. – P. 1845–1851.

86. Roostaei A.A. An analysis to plastic deformation behavior of AZ31 alloys during accumulative roll bonding process / A.A. Roostaei, A. Zarei-Hanzaki, M.H. Parsa, S.M. Fatemi-Varzaneh // Journal of Materials Science. – 2010. – Vol. 16. – P. 4494-4500.

87. Zhilyaev, A.P Microhardness and micro-structural evolution in pure nickel during high-pressure torsion / A.P. Zhilyaev, S. Lee, G.V. Nurislamova, R.Z. Valiev, T.G. Langdon // Scripta Materialia. – 2001. – Vol. 44. – P. 2753–2758.

88. Todaka, Y. Bulk submicrocrystalline ω -Ti produced byhigh-pressure torsion straining / Y. Todaka, J. Sasaki, T. Moto, M. Umemoto // Scripta Materialia. – 2008. – Vol. 59. – P. 615–618.

89. Matsunoshita H. Ultrafine-grained magnesium-lithiumalloy processed by high-pressure torsion: Low-temperature superplasticity and potentialfor hydroforming / H. Matsunoshita, K. Edalati, M. Furui, Z. Horita // Materials Science & Engineering A. – 2015. – Vol. 640. – P. 443–448.

90. Wang, C.P., Review on modified and novel techniques of severe plastic deformation / C.P. Wang, F.G. Li, W. Lei, H.J. Qiao // *Sci. China Technol.* – 2012. – Vol. 55. – P. 2377 – 2390.

91. Orlov, D. Plastic flow, structure and mechanical properties in pure Al deformed by twist extrusion / D. Orlov, Y. Beygelzimer, S. Synkov, V. Varyukhin, N. Tsuji, Z. Horita // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2009. – Vol. 519. – P. 105–111.

92. Segal, V.M. Equal channel angular extrusion (ECAE) / V.M. Segal // *In Severe Plastic Deformation Technology*; Rosochowski, A., Ed.; Whittles Publishing: Dunbeath, UK. – 2017. – P. 1–40.

93. Valiev, R.Z. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / Valiev, R.Z. and Langdon, T.G. // *Prog. Mater. Sci.* – 2006. – Vol. 51. – P. 881–981.

94. Valiev, R.Z. Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties / R.Z. Valiev // *Nat. Mater.* – 2004. – Vol. 3. – P. 511–516.

95. Чувильдеев, В.Н. Исследование усталостных свойств микроструктурных сплавов системы Al – Si / В.Н. Чувильдеев, Ю.П. Вишня, М.Ю. Грязнов // *Вестник ТГУ.* – 2013. – №18. – С. 1582-1590.

96. Юнусова, Н.Ф. Высокопрочное состояние в наноструктурном алюминиевом сплаве, полученном интенсивной пластической деформацией. // *Физика металлов и металловедение.* 2002. - Т.93. - №1. - С. 94-99.

97. Ахмадеев Н.А., Валиев Р.З., Копылов В.И., Мулюков Р.Р. Формирование субмикроструктуры в меди и никеле с использованием интенсивного сдвигового деформирования. // *Металлы.* – 1992. – №5. – С. 96-101.

98. Сысоев, А.Н. Усталостные свойства нано- и микроструктурных алюминиевых сплавов: новый метод испытаний и результаты экспериментальных исследований / А.Н. Сысоев, М.Ю. Грязнов, В.Н. Чувильдеев, В.И. Копылов, А.А. Павлюков // *Вестн. ННГУ.* – 2010. – №5. – С. 46-52.

99. Маркушев, М.В. К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения

объемных наноструктурных материалов / М.В. Маркушев // Письма о материалах. – 2011. – №1. – С. 36-42.

100. Yu, H.L. A deformation mechanism of hard metal surrounded by soft metal during roll forming / H.L. Yu, A.K. Tieu, C. Lu, X. Liu, A. Godbole, H.J. Li, C. Kong, Q.H. Qin // Scientific Reports. – 2014. – №1. – С. 5017 - 5030.

101. Langdon, T.G. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications / T.G. Langdon, A.P. Zhilyaev // Prog. Mater. Sci. – 2008. – Vol. 53. – P. 893–979.

102. Farojiet, G. Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a novel severe plastic deformation process / G. Farojiet; A. Babaei; M.M. Mashhadi // Mater. Lett. – 2012. – Vol. 77. – P. 82–85.

103. Jamaati, R. Fabrication of nano/ultrafine-grained IF steel via SPD process / R. Jamaati, M.R. Toroghinejad,; H. Edris, M.R. Salmani // A Review. Trans. Indian Inst. Met. – 2014. – Vol. 67. – P. 787–802.

104. Lu, C. Special rolling techniques for improvement of mechanical properties of ultrafine-grained metal sheets: A review / C. Lu, H.L. Yu, K. Tieu, H.J. Li // Adv. Eng. Mater. – 2016. – Vol. 18. – P. 754–769.

105. Lee, S.H. Influence of flow stress and friction upon metal flow in upset forging of rings and cylinders / S.H. Lee, T. Altan // J. Eng. Ind. – 1972. – Vol. 94. – P. 769 – 775

106. Huang, J.Y. Microstructures and dislocation configurations in nanostructured copper processed by corrugation and straightening / J.Y. Huang, Y.T. Zhy, H. Jiang // Acta Mater. – 2001. – Vol. 49. – P. 1497–1505.

107. Wang, Y. Dynamic processes for nanostructure development in Cu after cryogenic rolling deformation / Y. Wang, T. Jiao // Mater. Trans. – 2003. – Vol. 44. – P. 1926–1934.

108. Wang, Y. The effect of cumulative large plastic strain on structure and properties of CuZn alloy. Mater. / Y. Wang, Z.Y. Liu, G.X. Liang, E.D. Wang // Sci. Eng. A. – 1998. – Vol. 242. – P. 137–140.

109. Китайский, В.Е. Особенности горячего изгибного деформирования трубной полосы / Китайский В.Е. // Конструкции и исследования машин для обработки проката: Сб. науч. тр. ВНИИМЕТМАШ. – 1977. – №48. – С. 141–147.

110. Рааб, Г.И. Перспективы использования методов интенсивной пластической деформации для получения высокопрочных металлических материалов в промышленных масштабах / Г.И. Рааб // Сборник материалов IV международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» . – 2011. –С. 205-206.

111. Бейгельзимер, Я.Е. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации : монография / Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г. // Донецк: Фирма ТЕАН, 2003.– 87 с.

112. Разработка и исследование процессов упрочнения сталей массового назначения деформацией многократным знакопеременным изгибом. Отчет о НИР / НИИКМ и ТП МГТУ им. Н.Э.Баумана, рук. Крылов Н.И. № ГР 01890081476. – М., 1989. – 51 с.

113. Кожевников, И.В. Упрочнение термопластической обработкой полосового проката низкоуглеродистых сталей / И.В. Кожевников // Повышение механических и эксплуатационных свойств сталей массового назначения: Тез. докл. Всесоюзной научно-техн. конф. – 1990. –С. 18-19.

114. Крылов, М.Н. Разработка и исследование процессов термопластической обработки полосового проката с деформированием в планетарных машинах: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05. М. 1991.

115. Крылов, Н.И. Создание агрегата термопластической обработки листов шириной до 1550 мм / Н.И. Крылов // Совершенствование процессов и машин для обработки проката: Сб. науч. тр. ВНИИМЕТМАШ. М. – 1988. С. 44–50.

116. Крылов, Н.И. Исследование упрочнения полосового проката / Н.И. Крылов // Создание, исследование и внедрение машин для получения проката высокого качества: Сб. науч. тр. ВНИИМЕТМАШ. – 1982. С. 48–52.

117. Выдрин, В.Н. Исследование непрерывной прокатки в станах с одним приводным валком / В.Н. Выдрин, В.И. Крайнов // Теория и технология прокатки: сб. науч. тр. – 1967. – №162. – С. 31-38.

118. Бровман, М.Я. Исследование асимметричной прокатки. Сообщение 1 / М.Я. Бровман // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1982. – №3. – С. 50 – 53.

119. Королёв, А.А. О холодной прокатке с рассогласованием скоростей валков / А.А. Королёв // Сталь. - 1973. - № 10. - С. 906-910.

120. Полухин, П.И. Прокатное производство : учебное пособие / П.И. Полухин, М.Н. Федосов, А.А. Королев, Ю.И. Матвеев // Москва : Металлургия, 1960. - 966 с.

121. Полухин, В.П. Контактное взаимодействие металла с валками при несимметричной прокатке тонких полос. Сообщение 1 / В.П. Полухин, В.Н. Скороходов // Изв. вузов. Чёрная металлургия. - 1976. - № 12. - С. 81-84.

122. Химич, Г.Л. Устойчивость полосы при знакопеременном изменении неравномерности деформации / Г.Л. Химич и др. // Известия вузов. Черная металлургия, 1984. - №12. - С. 47-50.

123. Потапкин, В.Ф. Исследование напряжённо-деформированного состояния металла при прокатке-волочении / В.Ф. Потапкин, В.А. Федоринов, А.В. Сатонин // Изв. вузов. Чёрная металлургия. - 1983. - № 11. - С. 75-80.

124. Доброносков, Ю.К. Особенности деформации металла при асимметричной прокатке тонких полос / Ю.К. Доброносков, В.Ф. Потапкин, А.В. Сатонин, // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. -1987. - № 4. - С. 62-66.

125. Сатонин А.В. Нормальные контактные напряжения при прокатке с волочением и обычной прокатке / А.В. Сатонин, В.Ф. Потапкин, В.А. Федоринов // Оборудование для прокатного производства: Реф. Сб. ЦНИИТЭИтяжмаш. - 1984. - № 1. - С. 19-22

126. Сатонин, А.В. Особенности деформации металла при асимметричной прокатке тонких полос / А.В. Сатонин, В.Ф. Потапкин, , Ю.К. Доброносков // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. -1987. - № 4. - С. 62-66.

127. Скороходов, В.Н. Расчёт параметров несимметричного процесса прокатки тонких полос. Сообщение 1 / Скороходов В.Н., Полухин В.П. // Изв. вузов. Чёрная металлургия. - 1977. - № 1. - С. 169-170.

128. Скороходов, В.Н. Получение высокоточного холоднокатаного листа для офсетной печати способом несимметричной прокатки. Сообщение 2 / А.Ф. Пименов, В.П. Полухин, В.Н. Скороходов и др. // Изв. вузов. Чёрная металлургия. - 1980. - № 11. - С. 67-72.

129. Ефремов, Н.И. Разработка технологии асимметричной прокатки на основе результатов исследования особенностей напряжённо-деформированного состояния тонкого листа в очаге деформации: автореф. дис. ... канд. техн. наук /Н.И. Ефремов. -М., 1985. - 22 с.

130. Пименов, А.Ф. Получение высокоточного холоднокатаного листа для офсетной печати способом несимметричной прокатки. Сообщение 1 /А.Ф. Пименов, В.П. Полухин, В.Н. Скороходов и др. // Изв. вузов. Чёрная металлургия. - 1980. - № 9. - С. 64-67.

131. Cheon, B. H. Asymmetric rolling of strip-cast Al-5.5Mg-0.3Cu alloy sheet: Effects on the formability and mechanical properties / Journal Materials Science and Engineering A. – 2011. – Vol. 528. – P. 5223-5227.

132. Dyja, H. Theoretical analysis of the asymmetric rolling of sheets on leader and finishingstands / H. Dyja, M. Knapieński, A. Kawaek // J. Mater. Process. Technol. – 2003. – Vol. 138. – P. 183– 188.

133. Huang, J. Y. Microstructures and dislocation configurations in nanostructured Cu processed by repetitive corrugation and straightening/ Huang J. Y., Zhy Y. T., Jiang H., Lowe T. C. - Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, USA. – 2001. – P. 110-115.

134. Liu, C.Y. Evaluation of mechanical properties of 1060-Al reinforced with WC particles via warm accumulative roll bonding process / C.Y. Liu, Q. Wang // Materials & Design. – 2013. – Vol. 43. – P. 367-372.

135. Yu, H.L. A deformation mechanism of hard metal surrounded by soft metal during roll forming / Yu H.L., Tieu A.K., Lu C., Liu X., Godbole A., Li H.J., Kong C., Qin Q.H. // *Scientific Reports*. – 2014. – Vol. 4.

136. Zhang X.Y. Shear Deformation and Grain Refinement in Pure Al by Asymmetric Rolling / Zhang XingYao, Fang-Qing Zuo, Jian-Hua Jiang, Ai-Dang Shan, Jian-Min Fang // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2008. – Vol. 18. – P. 774-777.

137. Салганик, В.М. Асимметричная тонколистовая прокатка: развитие теории, технологии и новые решения : учебное пособие // В.М. Салганик, А.М. Песин - Магнитогорск, 1997. - 177 с.

138. Песин, А.М. Моделирование температурных полей в очаге деформации при асимметричной прокатке алюминиевых сплавов / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Р.К. Вафин // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. -2015. - № 4. - С. 75-81.

139. Pesin, A. Finite Element Modeling of Shear Strain in Rolling with Velocity Asymmetry in Multi-Roll Calibers / A. Pesin, M. Chukin, A. Korchunov, D. Pustovoytov // *Key Engineering Materials*. – 2014. – Vol. 622. – P. 912-918.

140. Pesin, A. Influence of Process Parameters on Distribution of Shear Strain through Sheet Thickness in Asymmetric Rolling / A. Pesin, D. Pustovoytov // *Key Engineering Materials*. – 2014. – Vol. 623. – P. 929-935.

141. Pesin, A. Numerical Study of Grain Evolution and Dislocation Density during Asymmetric Rolling of Aluminum Alloy 7075/ A. Pesin, A. Korchunov, D. Pustovoytov // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 685. – P. 162-166.

142. Пустовойтов, Д.О. Моделирование сдвиговых деформаций в предельном случае асимметричной тонколистовой прокатки / Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Перехожих А.А., Сverdlik М.К // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. -2013. - № 11. - С. 65-68.

143. Sverdlik, M. Numerical research of shear strain in an extreme case of asymmetric rolling / Sverdlik M., Pesin A., Pustovoytov D., Perekhozhikh A. // *Science*,

Technology and Higher Education: materials of the international research and practice conference. – 2012. – Vol. 2. – P. 486-492.

144. Pustovoytov, D.O. Simulation of the stress-strain state during asymmetric sheet rolling of aluminum alloy 5083 under ultrahigh shear strain / D.O. Pustovoytov, A.M. Pesin, M.K. Sverdlik // – 2014. – Vol. 1.

145. Пустовойтов, Д.О. Математическое моделирование эволюции зерна при асимметричной прокатке чистого алюминия и сплава 7075 / Д.О. Пустовойтов, А.М. Песин, М.К. Сverdlik // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. -2015. - № 4. - С. 81–87.

146. Pesin, A. Finite Element Modeling of Roll Wear during Cold Asymmetric Sheet Rolling of Aluminum Alloy 5083 / Pesin A., Pustovoytov D., Shveyova T., Sverdlik M. // MATEC Web of Conferences. – 2015. – Vol. 26. – P. 1-4.

147. Pesin, A., M. Finite Element Modeling of Shear Strain in Asymmetric and Symmetric Rolling in Multi Roll Calibers / A. Pesin, M. Chukin, A. Korchunov, D. Pustovoytov. // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 81. – P. 2469-2474.

148. Чикишев, Д.Н. Совершенствование технологии производства деталей крупногабаритных тел вращения на основе математического моделирования процессов деформирования толстых стальных листов : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.16.05 / Чикишев Денис Николаевич; Магнитог. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2007. – 18 с.

149. Песин, А.М. Компьютерное моделирование новых методов интенсивной пластической деформации металлов и сплавов: монография / Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Вафин Р.К., Швеёва Т.В. – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2019. – 146 с.

150. Утяшев, Ф.З. Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов: Акад. наук Республики Башкортостан, Отд-ние физ.-мат. и технических наук : учебное пособие / Ф.З. Утяшев, Г.И. Рааб – Уфа: Гилем, 2013. – 375 с.

151. Ji, Y.H. Development of Severe Plastic Deformation by Various Asymmetric Rolling Processes / Y.H. Ji, J.J. Park // Materials Science and Engineering: A. – 2009. – Vol. 499. – P. 14-17.

152. Ji, Y.H. Finite Element Analysis of Severe Deformation in Mg-3Al-1Zn Sheets through Differential-Speed Rolling with a High Speed Ratio / Y.H. Ji, J.J. Park, W.J. Kim // Materials Science and Engineering: A. – 2007. – Vol. 454. – P. 570-574.

153. Cui, Q. Grain refinement of high purity aluminum by asymmetric rolling / Cui Q, Ohori K. // Materials Science and Technology. – 2000. – Vol. 16. – P. 1095- 1101.

154. Pesin, A., Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling / A. Pesin, D. Pustovoytov // Key Engineering Materials. – 2014. – P. 929-935.

155. Pustovoitov, D.O. Influence of small microscopic grooves of work rolls on strain gradient induced in metal sheets during symmetric and asymmetric rolling / D.O. Pustovoitov, A.M. Pesin, N.M. Lokotunina, A.E. Kozhemiakina // 28th International Conference on Metallurgy and Materials CONFERENCE PROCEEDINGS Metal. – 2019. – Vol. 1. – P. 265-270.

156. Малыгин, Г.А. Пластичность и прочность микро- и нанокристаллических материалов / Г.А. Малыгин // Физика твердого тела. -2007. - № 49. - С. 961-982.

157. Александров, И.В. Аналитическое моделирование напряжения течения сплава Al 1570, подвергнутого интенсивной пластической деформации / И.В. Александров, Р.Г. Чембарисова, М.И. Латыпов // Вестник УГАТУ. -2012. - № 16. - С. 115–125

158. Песин, А.М. Моделирование температурных полей в очаге деформации при асимметричной прокатке алюминиевых сплавов / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Р.К. Вафин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2015. - № 4. - С. 75-81.

159. Песин, А.М. Исследование влияния скоростной асимметрии на параметры различных процессов листовой прокатки / Песин А.М., Дья Х., Кавалек А., Сжинский П., Пустовойтов Д.О., Сатонин А.В., Чуруканов А.С. //

Вестник Магнитогорского Государственного Технического Университета Им. Г.И. Носова. – 2013. – с. 34 – 42.

160. Tsuji, N. Accumulative roll-bonding and other new techniques to produce bulk ultrafine-grained materials / Tsuji N., Saito Y., Lee S.-H., Minamino Y. – Weinheim. – 2003. – 343p.

161. Chen, Z. Effect of cross accumulative roll bonding process on microstructure and mechanical properties of laminated 1100/7075 composite sheets / Zejun Chen, Hongbo Hu, Xia Wu, Minhong Zhou, Kawunga Nyirenda, Qing Liu, Guojun Wang, Deman Wang – The 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processings. – 2013. – P. 2285 – 2295.

162. Verstraete, K. Comparison between ARB and CARB processes on an AA5754/AA6061 composite / K Verstraete, A-L Helbert, F Brisset and T Baudin – IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering . – 2014. – Vol. 63. – P. 1 – 5.

163. АО Нытва: официальный сайт. – Пермский край, Нытва. – Обновляется в течение суток. — URL: <http://www.nytva-nmz.ru/production/metal-production> (дата обращения 20.10.2020).

164. Beausir, B. Comparison between ARB and CARB processes on an AA5754/AA6061 composite, 6th International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation / B. Beausir, K. Verstraete, O. Bouaziz, E. Bouzy, T. Grosdidier, L.S. Toth, Eds. – 2014.

165. Kamikawa, N. Effect of redundant shear strain on microstructure and texture evolution during accumulative roll-bonding in ultralow carbon IF steel, / N. Kamikawa, T. Sakai, N. Tsuji // Acta Materialia. – 2007. – P. 5873-5888.

166. Lee, T.O. Microstructural evolution and mechanical properties of ultrafine grained commercially pure 1100 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding (ARB) / T.O. Lee, Y.S. Kim, D.H. Shin // Designing, Processing and Properties of Advanced Engineering Materials, Pts 1 and 2, S.G. Kang, T. Kobayashi, Eds. – 2004. – P. 625-628.

167. Sato, Y.S. Friction stir welding of ultrafine grained Al alloy 1100 produced by accumulative roll-bonding / Y.S. Sato, Y. Kurihara, S.H.C. Park, H. Kokawa, N. Tsuji // *Scripta Materialia*. – 2004. – Vol. 50. – P. 57-60.

168. Liu, C.Y. Evaluation of mechanical properties of 1060-Al reinforced with WC particles via warm accumulative roll bonding process / C.Y. Liu, Q. Wang, Y.Z. Jia, B. Zhang, R. Jing, M.Z. Ma, Q. Jing, R.P. Liu // *Materials & Design*. – 2013. – Vol. 43. – P. 367-372.

169. Yu, H.L. A deformation mechanism of hard metal surrounded by soft metal during roll forming / H.L. Yu, A.K. Tieu, C. Lu, X. Liu, A. Godbole, H.J. Li, C. Kong, Q.H. Qin // *Scientific Reports*. – 2014. – Vol. 4.

170. Kim, Y.S. Sliding wear characteristics of ultrafine-grained non-strain-hardening aluminum-magnesium alloys / Y.S. Kim, J.S. Ha, D.H. Shin, Z.Y. Zhong, H. Saka, T.H. Kim, E.A. Holm, Y.F. Han, X.S. Xie, Eds. // *Prism 5: The Fifth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing*, Pts 1-5. – 2005. – P. 401-404.

171. Farahat, A. Accumulative Roll Bonding of 1050 Aluminium Alloy / A. Farahat // *World of Metallurgy – ERZMETALL*. – 2015. – Vol. 68. – P. 5-12.

172. Bogucka, J. Influence of temperature of accumulative roll bonding on the microstructure and mechanical properties of aa5251 aluminum alloy / J. Bogucka // *Archives of metallurgy and materials*. – 2014. – Vol. 59. – P. 127-131.

173. Vini, M.H. Mechanical Properties and Microstructural Evolution of AA5083/Al₂O₃ Composites Fabricated by Warm Accumulative Roll Bonding / M.H. Vini, M. Sedighi, M. Mondali // *Advanced Design and Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 9. – P. 13-22.

174. Zheng, R. Effect of Accumulative Roll Bonding (ARB) and Subsequent Aging on Microstructure and Mechanical Properties of 2024 Al Alloy / Ruixiao Zheng, Tilak Bhattacharjee, Akinobu Shibata, Nobuhiro Tsuji and Chaoli Ma / *Materials transactions*. – 2016.

175. Pereira, G.S. Microstructural and mechanical characterization of lightweight metal matrix composite laminates manufactured by accumulative roll bonding / G.S.

Pereira, R. Aureliano, R. Sayama, T. P. Anjoletto, Ю. R. Tarpani // BCCM-3 – Brazilian Conference on Composite Materials. – 2016. –P. 1-9

176. Rezaei, M. R. Production of nano-grained structure in 6061 aluminum alloy strip by accumulative roll bonding / M. R. Rezaei, M. R. Toroghinejad, Fakhreddin A. // Materials Science and Engineering. – 2011. –P. 1-5

177. Lee, S.H. Fabrication and mechanical properties of a nanostructured complex aluminum alloy by three-layer stack accumulative roll-bonding / S.H. Lee, S.R. Lee // Archives of metallurgy and materials. – 2015. – Vol. 60. – P. 1195-1198.

178. Гуревич, С.М. Справочник по сварке цветных металлов : учебное пособие / С.М. Гуревич // Киев: Наукова Думка, 1981. – 608 с.

179. Лысак, В.И. Определение критических границ процесса сварки взрывом / В.И. Лысак, В.С. Седых, Ю.П. Трыков // Сварочное производство. - 1984. – с. 6-8.

180. Рябов, В.Р. Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами : учебное пособие / В.Р. Рябов // Киев: Наукова Думка, 1983. – 755 с.

181. Рабкин, Д.М. Сварка разнородных металлов : учебное пособие / Д.М. Рабкин, В.Р. Рябов, С.М. Гуревич // Киев: Техника, 1975. – 208 с.

182. Ершов, А.А. Исследование реакционной диффузии в трехлоном биметалле алюминий-латунь / А.А. Ершов, Т.А. Сычева, П.Ф. Засуха // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1977. – с. 19-22.

183. Alizadeh, M. Strength prediction of the ARBed Al/Al₂O₃/B₄C nanocomposites using Orowan model / Alizadeh, M. // Materials Research Bulletin y. – 2014. – Vol. 59. – P. 290-294.

184. Tylecote R.F. Investigation on pressure welding / R.F. Tylecote // Brit. Weld J. – 1954. – Vol. 1. – P. 74-80.

185. Jamaati, R. Effect of particle size on microstructure and mechanical properties of composites produced by ARB process / R. Jamaati // Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing. – 2011. – Vol. 528. – P. 2143-2148.

186. Bagherpour E. , M. Reihanian, M.H. Paydar, Particle distribution in metal matrix composites fabricated by accumulative roll bonding, *Materials Science and Technology*. – 2012. – Vol. 28. – P. 103-108.

187. Bagherpour, E. M. Tailoring particle distribution non-uniformity and grain refinement in nanostructured metal matrix composites fabricated by severe plastic deformation (SPD): a correlation with flow stress / E. M. Bagherpour // *Journal of Materials Science*. – 2017. – Vol. 52. – P. 3436-3446.

188. Ghalandari, L., High-strength and high-conductive Cu/Ag multilayer produced by ARB / L. Ghalandari // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2010. – Vol. 506. – P. 172-178.

189. Talebian, M. Manufacturing Al/steel multilayered composite by accumulative roll bonding and the effects of subsequent annealing on the microstructural and mechanical characteristics / M. Talebian // *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*. – 2014. – Vol. 590. – P. 186-193.

190. Dehsorkhi, R.N. Investigation on microstructure and mechanical properties of Al-Zn composite during accumulative roll bonding (ARB) process / R.N. Dehsorkhi // *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*. – 2011. – Vol. 53. – P. 63-72.

191. Парсункин, Б.Н. Использование экспериментально – статистических методов моделирования для управления технологическими процессами : учебное пособие – Магнитогорск, 2012. - 177с.

192. Вдовин, К.Н. Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах: междунар. сб. тр : учебное пособие – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск, МГТУ, 2012. - 408 с.

193. Власов, А.В. Моделирование тепловых процессов при ОМД методом конечных объемов в программе QForm / А.В. Власов // Научно-технический и производственный журнал КИПП ОМД (Кузнечно-штамповочное производство , Обработка материалов давлением). - 2016. - № 11. - С. 21 – 24.

194. Shahsavari, A. Significant Increase in Tensile Strength and Hardness in 2024 Aluminum Alloy by Cryogenic Rolling A. / Shahsavaria, F. Karimzadeha, A. Rezaeiana, H. Heydari *Procedia Materials Science*. – 2015. – Vol. 11. – P. 84 – 88.

195. Heydari, V. M. Mechanical Properties and Microstructural Evolution of AA5083/Al₂O₃ composites Fabricated by Warm Accumulative Roll Bonding / M. Heydari Vini, M. Sedighi, M. Mondali // *Advanced Design and Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 9.

196. Heydari, V. M. Mechanical Mechanical properties and bond strength of bimetallic AA1050/AA5083 laminates fabricated by warm-accumulative roll bonding / M. Heydari Vini, M. Sedighi. *Canadian Metallurgical Quarterly*. – 2017.

197. Zheng, R. Effect of Accumulative Roll Bonding (ARB) and Subsequent Aging on Microstructure and Mechanical Properties of 2024 Al Alloy / Ruixiao Zheng, Tilak Bhattacharjee, Akinobu Shibata, Nobuhiro Tsuji and Chaoli Ma / *Special Issue on Advanced Materials Science in Bulk Nanostructured Metals III The Japan Institute of Metals and Materials*. – 2016. – P. 2-9

198. Kashihara, K. Effect of imposed strain and annealing temperature on uniform elongation in A5052 alloy processed by accumulative roll bonding / Keizo Kashihara, Yoshikazu Komi, Nobuhiro Tsuji / *Advance Publication by J-STAGE Mechanical Engineering Journal*. – 2016.

199. Farahat, A. Accumulative Roll Bonding of 5082 Aluminium Alloy / Ahmed Ismail Zaky Farahat / *World of Metallurgy – ERZMETALL*. – 2015. – Vol. 68. – P. 14-18.

200. Alvandi, H. Microstructural and Mechanical Properties of Nano/Ultra-Fine Structured 7075 Aluminum Alloy by Accumulative Roll-Bonding Process / H. Alvandia, K. Farmanesha/ / *Procedia Materials Science - 5th International Biennial Conference on Ultrafine Grained and Nanostructured Materials, UFGNSM15*. – 2015. – Vol. 68. – P. 17-23.

201. Nie, J. Fabrication of Al/Mg/Al Composites via Accumulative Roll Bonding and Their Mechanical Properties / Jinfeng Nie, Mingxing Liu, Fang Wang, Yonghao Zhao, Yusheng Li, Yang Cao, Yuntian Zhu // *Materials* . – 2016. –P. 14-22.

202. Бирюкова, О.Д. Моделирование и сравнительный анализ деформированного состояния металла при пакетной и асимметричной тонколистовой прокатке / О.Д. Бирюкова, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов // XI Международном конгрессе прокатчиков: материалы международной научно - технической конференции, Магнитогорск – 2017. – с.420-426.

203. Biryukova, O. The effect of speed asymmetry on the strain state in aluminium bimetals during accumulative rolling / O. Biryukova, A. Pesin, D. Pustovoitov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – vol. 447 – pp. 1 –5.

204. Pesin, A. Modeling and comparison of strain behavior during symmetric and asymmetric accumulative roll bonding of aluminum sheets / A. Pesin, D. Pustovoitov, O. Biryukova // Metal – 2018. – pp. 444 – 449.

205. Бирюкова, О.Д. Исследование метода аккумулирующей прокатки как способа обработки алюминиевых композитов 5083/2024 и 5083/1070 / О.Д. Бирюкова, Д.О. Пустовойтов, А.М. Песин // Журнал «Теория и технология металлургического производства» – 2019. – с. 37-42.

206. Бирюкова, О.Д. Анализ и математическое моделирование процесса асимметричной прокатки алюминиевых сплавов серий 1xxx, 2xxx, 5xxx – 7xxx / О.Д. Бирюкова, Д.О. Пустовойтов // Журнал технических исследований. – 2019. – с.53-59.

207. Бирюкова, О.Д. Влияние скоростной асимметрии на деформационное состояние в алюминиевом биметалле 5083/1070 при пакетной прокатке / О.Д. Бирюкова, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов // Сплошные и слоистые материалы, Магнитогорск. – 2018. – №1. – с. 44-50.

208. Бирюкова, О.Д. Исследование деформированного состояния алюминиевых сплавов 1070, 2024 и 5083 при асимметричной и пакетной прокатке методом конечных элементов / О.Д. Бирюкова, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов // Сборник The 3rd International Youth Workshop Magnitogorsk Rolling Practice 2018 по материалам 3 молодежной научно-практической конференции – 2018. – № 3. – с.3-5.

209. Biryukova, O.D. Finite element modeling of effective strain in 1070/5053 and 2024/5053 aluminum composites processed by accumulative roll bonding / O.D. Biryukova, A.M. Pesin, D.O. Pustovoitov // Сборник по материалам научно-практической конференции ICFM-2019. – 2019.

210. Biryukova, O.D. Finite-element modeling of the strain state of aluminum alloys in process by the method of ARB / O.D. Biryukova, A.M. Pesin, D.O. Pustovoitov // Сборник The 4th International Youth Workshop Magnitogorsk Rolling Practice 2019 по материалам 4 молодежной научно-практической конференции – 2019. – № 4. – с. 17-19.

211. Pesin, A. M. FEM Simulation and analysis of temperature rise during asymmetric cryorolling of aluminum alloys with a large strain / A. Pesin, D. Pustovoitov, O. Biryukova // Metal – 2018. – pp. 298 – 303.

212. Бирюкова, О.Д. Анализ энергосиловых параметров процесса асимметричной аккумулярующей прокатки биметаллических алюминиевых композитов / О.Д. Бирюкова, Д.О. Пустовойтов // Туполевские чтения, Казань. – 2019. – с.235-239.

213. Pesin, A. FEM simulation of fabrication of Al-steel layered composites with mechanical bonding through the interfacial concavo-convex lock effect / A. Pesin, D. Pustovoitov, O. Biryukova, N. Plyina // Procedia Manufacturing – 2020. – vol.50 – pp. 579–583.

214. Песин, А.М. Возможности стана 400 асимметричной прокатки и роботизированного комплекса Kuка 160 / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, М.П. Барышников, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина, Л.В. Носов, Д.В. Грачев // Механическое оборудование металлургических заводов, Магнитогорск. – 2021. – №1 (16). – с. 9-13

215. Бирюкова, О.Д. Возможности получения градиентной структуры при асимметричном деформировании алюминиевого слоистого композита / О.Д. Бирюкова, Д.О. Пустовойтов, А.М. Песин, А.Е. Кожемякина // Теория и технология металлургического производства. – 2021. – №2(37). – С. 38–46.

216. Biryukova, O. Obtaining laminated aluminum composites with a gradient structure based on asymmetric deformation / O. Biryukova, A. Pesin, D. Pustovoytov, A. Kozhemiakina, L. Nosov // *Metal* – 2021. – pp. 496 – 501.

217. Песин, А.М. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 81–96.

218. Песин, А.М. Развитие процесса аккумулирующей прокатки алюминиевых биметаллов на основе применения скоростной асимметрии / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова // *Современные достижения университетских научных школ, сборник докладов национальной научной школы-конференции* – 2016. – с.20-22.

219. Патент РФ №2699473 МПК В21В 1/28. Способ производства холоднокатаной полосы. Авторы: Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М., Бирюкова О.Д. // Заявка: 2019101176, 17.01.2019. Опубликовано: 05.09.2019.

220. Патент Евразийский №039071 МПК В21В 1/28. Способ производства холоднокатаной полосы. Авторы: Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М., Бирюкова О.Д., // Заявка: 201900581, 27.12.2019. Опубликовано: 30.11.2021.

221. Патент РФ №2756086 МПК В32В 7/02. Способ получения слоистого биметалла сталь-алюминиевый сплав. Авторы: Песин А.М., Белов А.Я., Дискин А.В., Тулупов О.Н., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М., Бирюкова О.Д. // Заявка: 2021103956, 16.02.2021. Опубликовано: 27.09.2021.

222. Патент РФ № 2762696 МПК В32В 7/02. Способ получения слоистого проката. Авторы: Песин А.М., Белов А.Я., Пастернак Е., Белов В.К., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М., Бирюкова О.Д., Кожемякина А.Е. // Заявка: 2021101410, 22.01.2021. Опубликовано: 22.12.2021.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 699 473**⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
B21B 1/28 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B21B 1/28 (2019.05)

(21)(22) Заявка: 2019101176, 17.01.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
17.01.2019Дата регистрации:
05.09.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 17.01.2019

(45) Опубликовано: 05.09.2019 Бюл. № 25

Адрес для переписки:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр-кт Ленина, 38, ФГБОУ ВО "МГТУ им. Г.И.Носова", патентно-информационный отдел

(72) Автор(ы):

Песин Александр Моисеевич (RU),
Пустовойтов Денис Олегович (RU),
Локотунина Наталья Михайловна (RU),
Бирюкова Олеся Дмитриевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2542212 C1, 20.02.2015. RU 2061562 C1, 10.06.1996. SU 1304947 A1, 23.04.1987. SU 1093369 A, 23.05.1984. US 4385511 A, 31.05.1983.

(54) Способ производства холоднокатаной полосы

(57) Реферат:

Изобретение относится к обработке металлов давлением и может быть использовано для изготовления полосы. Холодную прокатку полосы в валках осуществляют при рассогласовании их окружных скоростей с единичной степенью деформации не менее 50 %, причем прокатку ведут до суммарной степени деформации 75-95 %. Одновременное повышение прочностных и пластических свойств на 5-10 %

с получением градиентной структуры металла обеспечивается за счет того, что прокатку осуществляют в валках разного диаметра, причем шероховатость первого валка R_a составляет 10,0-12,0 мкм, а R_a второго валка 0,5-2,5 мкм, при этом окружная скорость валков регламентирована математической зависимостью. 1 ил., 1 табл.

RU 2 699 473 C 1

RU 2 699 473 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 762 696**⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
B32B 7/02 (2006.01)
B23K 20/04 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B32B 7/02 (2021.08); B23K 20/04 (2021.08)

(21)(22) Заявка: 2021101410, 22.01.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
22.01.2021

Дата регистрации:
22.12.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 22.01.2021

(45) Опубликовано: 22.12.2021 Бюл. № 36

Адрес для переписки:
455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО "МГТУ им. Г.И. Носова",
Пыхтуновой С.В.

(72) Автор(ы):

Песни Александр Моисеевич (RU),
Белов Алексей Яковлевич (RU),
Пастернак Елена (AU),
Белов Валерий Константинович (RU),
Пустовойтов Денис Олегович (RU),
Локотунина Наталья Михайловна (RU),
Бирюкова Олеся Дмитриевна (RU),
Кожемякина Анна Евгеньевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Магнитогорский
государственный технический университет
им. Г.И. Носова" (ФГБОУ ВО "МГТУ им.
Г.И. Носова") (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2574948 C1, 10.02.2016. RU
2368475 C1, 27.09.2009. US 10864596 B2,
15.12.2020. JP H071161 A, 06.01.1995.

(54) СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОИСТОГО ПРОКАТА

(57) Реферат:

Изобретение относится к обработке металлов давлением и может быть использовано для изготовления металлического слоистого проката. Способ получения слоистого проката биметалла «сталь - алюминиевый сплав» из листовых заготовок включает предварительную механическую обработку поверхности одной из заготовок с формированием рельефа с зубчатым профилем в поперечном направлении к оси прокатки перед сборкой пакета, сборку пакета, состоящего из нескольких заготовок, совместную прокатку пакета за один проход с обжатием до

80% и термообработку. При этом осуществляют предварительную механическую обработку всех необработанных, контактирующих с другими заготовками поверхностей заготовок, входящих в пакет, причем на всех обработанных поверхностях формируют рельеф с зубчатым профилем в поперечном направлении к оси прокатки с высотой неровностей 20-70 мкм и углом при вершине зубчатого профиля неровностей рельефа 91°-105°, при этом обжатие собранного пакета должно составлять не менее 50%. 1 ил., 1 табл.

RU 2 762 696 C 1

RU 2 762 696 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19)

RU (11)

2 756 086⁽¹³⁾ C1

(51) МПК

B32B 7/02 (2006.01)

B23K 20/04 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

B32B 7/02 (2021.02); B23K 20/04 (2021.02)

(21)(22) Заявка: 2021103956, 16.02.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.02.2021Дата регистрации:
27.09.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 16.02.2021

(45) Опубликовано: 27.09.2021 Бюл. № 27

Адрес для переписки:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО "МГТУ им. Г.И. Носова",
Пыхтуновой С.В.

(72) Автор(ы):

Песин Александр Моисеевич (RU),
Белов Алексей Яковлевич (RU),
Дискин Аркадий Викторович (AU),
Тулупов Олег Николаевич (RU),
Пустовойтов Денис Олегович (RU),
Локотунина Наталья Михайловна (RU),
Бирюкова Олеся Дмитриевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Магнитогорский
государственный технический университет
им. Г.И. Носова" (ФГБОУ ВО "МГТУ им.
Г.И. Носова") (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете

о поиске: RU 2574948 C1, 10.02.2016. RU
2368475 C1, 27.09.2009. RU 2315697 C2,
27.01.2008. EP 2613896 B1, 02.03.2016. RU
2552464 C1, 10.06.2015. RU 2548343 C2,
20.04.2015.

(54) СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОИСТОГО БИМЕТАЛЛА СТАЛЬ-АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ

(57) Реферат:

Изобретение относится к обработке металлов давлением и может быть использовано для изготовления биметаллического слоистого проката. Способ получения слоистого биметалла сталь-алюминиевый сплав включает предварительную механическую обработку необработанных контактирующих поверхностей листовых заготовок из стали и алюминиевого сплава с формированием на них рельефа с заданным профилем в поперечном направлении к оси прокатки, сборку пакета, состоящего из листовых заготовок со сформированным на их контактирующих поверхностях рельефом, совместную прокатку пакета за один проход с обжатием 65-80% и термообработку. Осуществляют предварительную механическую

обработку необработанных контактирующих друг с другом поверхностей заготовок с формированием на соединяемых поверхностях нанесенного в поперечном направлении к оси прокатки трапециевидного рельефа с высотой трапециевидного выступа 20-70 мкм и с углами при основании трапециевидного рельефа $\alpha=40-55^\circ$. Сборку пакета осуществляют путем обеспечения захождения трапециевидных выступов одной контактирующей поверхности в трапециевидные впадины другой контактирующей поверхности. Повышается прочность при сохранении пластических свойств слоистого биметаллического проката. 1 ил., 1 табл.

RU 2 756 086 C1

RU 2 756 086 C1

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **039071**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.11.30

(51) Int. Cl. *B21B 1/28* (2006.01)

(21) Номер заявки
201900581

(22) Дата подачи заявки
2019.12.27

(54) **СПОСОБ ПРОИЗВОДСТВА ХОЛОДНОКАТАНОЙ ПОЛОСЫ**

(31) 2019101176

(56) RU-C1-2542212
SU-A1-1304947
SU-A-1093369
US-A-4385511

(32) 2019.01.17

(33) RU

(43) 2020.07.31

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
"МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г.И. НОСОВА" (ФГБОУ ВО
"МГТУ ИМ. Г.И. НОСОВА") (RU)**

(72) Изобретатель:
**Песни Александр Моисеевич,
Пустовойтов Денис Олегович,
Локотунни Наталья Михайловна,
Бирюкова Олеся Дмитриевна (RU)**

(74) Представитель:
Сагитов В.Р. (RU)

039071
B1

(57) Изобретение относится к обработке металлов давлением и может быть использовано для изготовления полосы. Холодную прокатку полосы в валках осуществляют при рассогласовании их окружных скоростей с единичной степенью деформации не менее 50%, причем прокатку ведут до суммарной степени деформации 75-95%. Одновременное повышение прочностных и пластических свойств на 5-10% с получением градиентной структуры металла обеспечивается за счет того, что прокатку осуществляют в валках разного диаметра, причем шероховатость первого валка R_a составляет 10,0-12,0 мкм, а R_a второго валка - 0,5-2,5 мкм, при этом окружная скорость валков регламентирована математической зависимостью.

039071
B1



पंडित द्वारका प्रसाद मिश्र
भारतीय सूचना प्रौद्योगिकी,
अभिकल्पन एवं विनिर्माण संस्थान जबलपुर
(संसदीय अधिनियम द्वारा स्थापित राष्ट्रीय महत्व का संस्थान)

Pandit Dwarka Prasad Mishra
Indian Institute of Information Technology,
Design & Manufacturing Jabalpur
(An Institute of National Importance established by an Act of Parliament)

.Act of implementation of the projects results

This act confirms that the results of the Indo-Russian projects “Numerical modeling and development of new methods for hybrid metal forming of complex parts of ultra-high strength (UHS) materials” (DST, India and RFBR, Russia) and “Development of low weight nanostructured functionally graded materials for high strength applications by hybrid asymmetric rolling and incremental forming methods” (DST, India and RSF, Russia) conducted by Pesin Alexander, Denis Pustovoytov, Pesin Ilya, Biryukova Olesya, Kozhemiakina Anna, Nosov Leonid, Grachev Dmitry are used in the process of teaching of graduate and doctoral students at PDPM Indian Institute of Information Technology, Design and Manufacturing, Jabalpur, India.

In the process of education, the following aspects are taken into account:

(i) new efficient technological schemes of asymmetric rolling, asymmetric accumulative roll bonding, allowing to obtain strips from steel, aluminum, titanium and copper alloys.

(ii) new efficient technological schemes of hybrid processes of asymmetric rolling and incremental forming, allowing to obtain products of complex shape from steel, aluminum, titanium and copper sheets with a gradient structure.

(iii) new dependences of the influence of the parameters of the asymmetric rolling process (thickness of the strip, relative reduction, ratio of the speeds of the work rolls, diameter of the work rolls, coefficient of friction, tension) on the heating of the metal in the rolls and the degree of gradient of its structure along the thickness of the strip in the range of the ratio of the speeds of the work roll from 1 to 10.

(iv) new dependences of the influence of the parameters of the accumulative roll bonding processes (thickness of each layer of the strip, relative reduction, ratio of work roll speeds, work roll diameter, coefficient of friction, tension) on the structure and mechanical properties of the layered composite.

Asymmetric rolling makes it possible to significantly (up to 6 times) reduce the rolling force, as well as increase technological plasticity (the possibility of deformation without defects increases from 40...50% to 80...90%).

The developed technological regimes make it possible to change (increase or decrease) the hardness of the metal within a wide range.

Besides teaching, we have also employed the research outcomes of Nosov Magnitogorsk State Technical University in our group's research work; and this has not only enhanced our research capabilities but has also led to interesting solutions for the Indian industry.


08-04-2022

Puneet Tandon
Indian PI

DST-RFBR and DST-RST Projects

Puneet Tandon
Professor
POP-M-HIT-DM

Jabalpur (Duma) Airport Road,
Jabalpur - 482005, M.P. India

Phone : +91+761-2794065, Fax : +91-761-2794094

Website : www.iiitdmj.ac.in

दुमना विमानतल मार्ग,
जबलपुर - 482005, म.प्र. भारत
दूरभाष : +91-761-2794065, फैक्स : +91-761-2794094
वेबसाईट : www.iiitdmj.ac.in



एक कदम स्वच्छता की ओर



УТВЕРЖДАЮ

Ректор МГТУ им. Г.И. Носова

М.В. Чукин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по результатам испытаний технических решений
на промышленно-лабораторном стане 400 асимметричной прокатки
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

На стане 400 асимметричной прокатки лаборатории Механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» проводили экспериментальное исследование получения листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024 методом асимметричной аккумуляющей прокатки.

Листовые слоистые алюминиевые композиты получали из алюминиевых сплавов 5083, 2024 и 1070 с исходными толщинами заготовок 1 – 2 мм и ширинами 50 – 100 мм. Прокатка осуществлялась тёплой, с температурой нагрева заготовок в печи до 380 °С. Межвалковый зазор составил 1,2 мм. При прокатке фиксировали усилие прокатки, моменты на валках.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Процесс прокатки протекал стабильно. С увеличением ширины заготовок снижались количество дефектов кромки, а также поперечная и продольная разнотолщинности.

Таблица 1 – Результаты опытной прокатки листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 (из заготовок 1 мм + 2 мм)

Отношение скоростей валков, $\frac{\text{об/мин}}{\text{об/мин}}$	Конечная толщина листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024, мм	Относительное обжатие, %	Усилие, кН
1	2	3	4
10/10 (1)	1,90	37	1330
10/6 (1,7)	1,60	47	1080
10/5 (2)	1,53	49	990
10/4,5 (2,2)	1,47	51	940
10/4 (2,5)	1,35	55	900
10/3,5 (2,8)	1,25	58	790
10/3 (3,3)	1,20	60	700
10/2,5 (4)	1,00	67	600
10/2 (5)	расплавился		

Таблица 2 – Результаты опытной прокатки листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070 (из заготовок 2 мм + 1 мм)

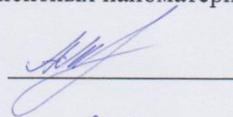
Отношение скоростей валков, $\frac{\text{об/мин}}{\text{об/мин}}$	Конечная толщина листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070, мм	Относительное обжатие, %	Усилие, кН
1	2	3	4
10/10 (1)	не сварилось		
10/8 (1,25)			
10/7 (1,4)	1,8	40	860
10/6 (1,7)	1,7	43	710
10/5 (2)	1,45	52	630
10/4 (2,5)	1,3	57	520
10/3 (3,3)	1,2	60	300
10/2 (5)	расплавился		

ВЫВОДЫ

Получение листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024 методом асимметричной аккумулярующей прокатки перспективно и целесообразно. Усилие прокатки при обработке 5083/2024 снижается с 1330 кН до 600 кН, обжатие увеличивается с 37% до 67%. Усилие прокатки при обработке 5083/1070 снижается с 860 кН до 300 кН, обжатие увеличивается с 40% до 60%. Это говорит о повышении технологической пластичности в процессе асимметричной аккумулярующей прокатки при увеличении отношения скоростей валков с 1 до 4.

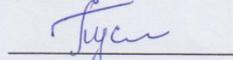
Научные сотрудники лаборатории Механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева:

Заместитель заведующего лабораторией, д.т.н.



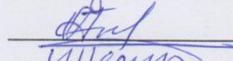
А.М. Песин

Начальник отдела научно-исследовательской лаборатории, к.т.н.



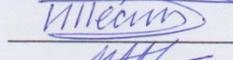
Д.О. Пустовойтов

Инженер



О.Д. Бирюкова

Инженер



И.А. Песин

Инженер

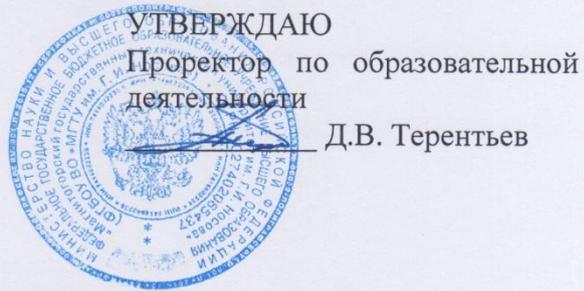


Л.В. Носов

Инженер



А.М. Барышникова



АКТ

об использовании в учебном процессе

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» результатов диссертационной работы Бирюковой О.Д.

Результаты диссертационной работы Бирюковой О.Д., связанной с совершенствованием процесса асимметричной аккумулярующей прокатки для улучшения механических свойств в листовых слоистых алюминиевых композитах, выполненной на кафедре технологий обработки материалов, внедрены в учебный процесс на основании рекомендаций методической комиссии Института металлургии, машиностроения и материалообработки.

В развитие подхода, разработанного на кафедре ТОМ ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» по использованию процесса асимметричной прокатки для производства продукции с высоким комплексом механических свойств, дополнительно предложено производить продукцию для автомобилестроения и космической промышленности из листовых слоистых алюминиевых композитов путём асимметричного деформирования.

В учебном процессе используются:

- Постановка задачи компьютерного моделирования процесса асимметричного деформирования, отличающаяся формулированием граничных и начальных условий, а также принятием допущений процесса.

- Рациональные технологические режимы асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов из сплавов 1070, 2024, 5083 обеспечивающие, с одной стороны, повышение прочности и технологической пластичности, а с другой – предотвращающие деформационный разогрев выше критического уровня.

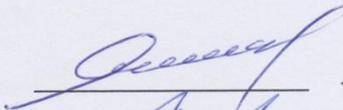
- Новые технологические схемы производства листовых слоистых алюминиевых композитов, опробованные на стане 400 асимметричной прокатки Лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

- Новые технические решения (патенты РФ № 2699473, № 2699432, №2756086 и №2762696), позволяющие существенно повысить механические свойства.

Полученные при исследовании результаты включены в лекционные и практические занятия по направлениям 22.03.02 Metallургия (курсы «Методы оптимизации процессов обработки металлов давлением», «Введение в направление»), 22.04.02 Metallургия, направленность (профиль) Инжиниринг инновационных технологий в обработке металлов давлением (курсы «Перспективы технологического развития в обработке материалов давлением на примере лучших изобретений», «Проектирование и технологическая поддержка инновационной деятельности наукоёмких производств», «Дизайн инновационных технологий в обработке материалов давлением».

Председатель методической комиссии
Института металлургии, машиностроения
и материалообработки

Заведующий кафедрой ТОМ




А.С. Савинов

А.Б. Моллер