

На правах рукописи



**БИРЮКОВА Олеся Дмитриевна**

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

2.6.4. Обработка металлов давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Песин Александр Моисеевич**

Официальные оппоненты: **Мазур Игорь Петрович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный  
технический университет», заведующий кафедрой  
«Обработки металлов давлением»

**Гамин Юрий Владимирович**  
кандидат технических наук,  
ФГАОУ ВО НИТУ «Московский институт стали и  
сплавов», доцент кафедры «Обработки металлов  
давлением»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный  
университет» (национальный исследовательский  
университет)

Защита состоится 18 октября 2022 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.324.01 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <http://www/magtu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

**Мезин Игорь Юрьевич**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ\*

**Актуальность работы.** 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. Листовой слоистый композит может быть изготовлен из двух слоев металла, которые могут быть разнородными (например, алюминий – сталь) или же иметь в качестве основы один металл (например, алюминиевый сплав 1070 – алюминиевый сплав 5083). В работе рассматриваются листовые слоистые композиты, изготовленные из алюминиевых сплавов. Продукция из листовых слоистых алюминиевых композитов может получить распространение в таких отраслях как: космическая, авиационная, автомобилестроительная, судостроительная, строительная и т.д.

Интересным является вопрос замены керосинового топлива на водородное для ракет носителей в космической отрасли. Однако существующие материалы, из которых изготавливается корпус топливного бака (алюминиевые сплавы 5083, 1469), подвержены водородной коррозии. Это отражается на стойкости агрегатов хранения, взрывоопасности объектов из-за их охрупчивания водородом. Появляется необходимость по поиску материалов для изготовления корпусов баков, которые не будут активно подвергаться коррозии. Одним из таких решений является использование листового слоистого алюминиевого композита, в котором один из слоев будет представлен алюминиевым сплавом первой серии (практически чистого алюминия, который мало подвергается водородной коррозии).

В автомобилестроении одной из основных задач является возможность снижения веса конструкции автомобиля. Целесообразной заменой стальной продукции выступают алюминиевые сплавы. Сейчас для ряда автомобилей (для габаритных частей кузова – капота, крыльев, крыши, дверей, днища) используются материалы, изготавливаемые чаще всего из алюминиевых сплавов бxxx серии. Однако они не обладают высокими значениями прочностных характеристик. Соответственно появляется задача повышения прочностных характеристик и эксплуатационной безопасности, решением которой может выступать замена однослойных алюминиевых сплавов на листовые слоистые алюминиевые композиты.

Следует отметить, что среди процессов, которые позволяют достигнуть высоких значений механических свойств в длинномерной продукции, одним из перспективных методов является асимметричная аккумулялирующая прокатка (ААП). Однако в основных публикациях рассматриваются только процессы с отношением скоростей валков ( $V_1/V_2$ ) не более 2. Влияние асимметрии в диапазоне отношения скоростей валков ( $V_1/V_2$ ) от 2 до 5 практически не изучено. Это вызывает необходимость исследования влияния такой асимметрии на свойства слоистых материалов. В связи с этим предложенная тема, несомненно, является актуальной.

---

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

**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 ААП. Изучением закономерностей поведения слоистых материалов при пластической деформации занимались: Г.Э. Аркулис, В.С. Блинов, А.Г. Кобелев, Ю.П. Трыков и др. Однако в их работах не рассматривается процесс ААП в широком диапазоне отношения скоростей рабочих валков ( $V_1/V_2 = 1...5$ ).

**Цель исследования:** Создание больших сдвиговых деформаций при асимметричной аккумулялирующей 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 ААП 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 ААП на механические свойства листовых слоистых алюминиевых композитов;

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

**Научная новизна.**

1. Определены необходимые границы областей гарантированного одновременного повышения прочности ( $\sigma_b$  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 ААП;

2. Для процесса ААП листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 впервые найден диапазон отношений скоростей рабочих валков ( $V_1/V_2 = 2,5...4$ ), отличающийся тем, что такой диапазон обеспечивает максимальные относительное удлинение  $\delta$  (12%) и отношение временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$  к пределу текучести  $\sigma_T$  (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) ААП 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 ААП, 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 ААП 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%) ААП листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024, позволяющие достичь требуемых значений эквивалентной деформации ( $\epsilon > 3$ ) и угла сдвига ( $\varphi > 70^\circ$ ); обеспечивающие одновременное попадание в границы области гарантированного повышения прочности ( $\sigma_v$  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 в задании соотношения скоростей рабочих валков в зависимости от толщин материалов и шероховатости валков при аккумулирующей 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. Джалалпур, 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 ААП; 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 ( $\sigma_b$  не менее 300 МПа) и технологической пластичности (с ростом коэффициента вытяжки до 5,5) при ААП листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024;

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

3. Возможности увеличения технологической пластичности с 42% до 77,5% при холодной ААП 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 ААП с определением глубины внедрения слоёв (при максимальной глубине внедрения слоя 5083 в композите 5083/2024 – 0,21 мкм, а глубина внедрения сплава 1070 в композите 5083/1070 – 0,15 мкм).

**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. Жилиева 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.); 27<sup>th</sup>, 30<sup>th</sup> 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.); 17<sup>th</sup> 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 конструкционных 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» финансируемой 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 РНФ 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 статьи 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 патента РФ и 1 Евразийском патенте.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и изложена на 143 страницах машинописного текста, включая 60 рисунков, 18 таблиц, 2 приложения и библиографический список из 222 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлена актуальность темы диссертационного исследования, сформулирована цель и задачи работы, показана научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации рассмотрено современное состояние производства листовых слоистых алюминиевых композитов, возможности их обработки методом интенсивной пластической деформации, а именно ААП, представлены особенности данного процесса.

**Во второй главе** разработана компьютерная модель и осуществлено численное исследование влияния различных параметров ААП листовых слоистых алюминиевых композитов на напряжённо-деформированное состояние металла. Определены начальные и граничные условия процесса для листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/2024, 5083/1070, 6061/2024, 6061/1070 (сплав 2024 в отожженном состоянии), которые включили в себя: начальную толщину отдельного слоя (1 – 2 мм), коэффициенты трения (0,1 – 0,4 по закону Амонта-Кулона), относительные обжатия (50 – 70%), радиусы рабочих валков (170 – 250 мм), окружные скорости верхнего (10 об/мин) и нижнего (2,5 – 10 об/мин) рабочих валков. Компьютерное моделирование проводилось в программных комплексах «DEFORM 2D/3D» (без учета влияния температуры) и «QFORM 2D/3D» (с учетом влияния температуры, при этом начальная температура заготовок составила 250°С).

Одним из главных факторов, влияющих на получение высоких значений комплекса механических свойств, является существенная сдвиговая деформация, которую возможно получить осуществлением одновременно больших деформаций сжатия и сдвига. Она характеризуется значением эквивалентной деформации  $\epsilon$  и углом сдвига  $\phi$ , определяемым как угол отклонения вертикального сечения на входе в очаг деформации от сечения на выходе из очага.

Анализ работ показывает, что для достижения высоких значений механических свойств, минимальное требуемое значение эквивалентной деформации  $\epsilon$  составляет 2...4, а угла сдвига  $\phi > 65^\circ \dots 70^\circ$ . Достижение данных значений обеспечит попадание в область, гарантирующей повышение значений прочности и технологической пластичности в листовом слоистом алюминиевом композите (необходимые условия), что требует экспериментального подтверждения. Кроме того, параметры процесса ААП должны соответствовать критериям снижения изгиба полосы при обработке (достаточные условия).

Показано, что для листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/2024, 5083/1070, 6061/2024, 6061/1070 при любых отношениях скоростей валков, значения эквивалентной деформации, полученной после первого цикла обработки недостаточно (минимально получено 0,5), в связи с этим требуется второй цикл для достижения значений эквивалентной деформации выше 2. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Минимальные значения основных показателей, влияющих на свойства листовых слоистых алюминиевых композитов (с отношением толщин слоёв 2 : 1)

Материал	1 цикл ААП		2 цикл ААП	
	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 (температура металла перед входом в клеть 250°С)				
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

Выявлено, что для успешной реализации процесса и получения необходимого значения эквивалентной деформации и угла сдвига необходимо создать условия, при которых коэффициент трения (между инструментом и металлом) при аккумулирующей прокатке листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070, 6061/1070 будет составлять не менее 0,2. Для 5083/2024, 6061/2024 – не менее 0,3.

Подтверждено, что для прямолинейного выхода листового слоистого композита из очага деформации при ААП при увеличении толщин заготовок, также как и значений относительных обжатий и прочности исходного материала требуется увеличивать значение отношений скоростей валков. Требуемые минимальные значения отношения скоростей валков при коэффициенте трения 0,3 в зависимости от толщин исходных заготовок (при относительном обжатии 50 – 70%) находятся в диапазоне: от 1,25 для заготовок с минимальной толщиной 1 мм для каждого слоя при относительном обжатии 50% до 3,5 для заготовок с максимальной толщиной 2 мм для каждого слоя при относительном обжатии 70%.

Также оценено состояние границы соединения металлов, образующей межслойную границу. При увеличении значений отношений скоростей валков в листовом слоистом алюминиевом композите 5083/1070 отклонение межслойной границы от оси соединения сплавов увеличивается в среднем от 0,015 мкм до 0,15 мкм преимущественно в сторону сплава 5083. В листовом слоистом алюминиевом композите 5083/2024 отклонение от оси соединения сплавов увеличивается в среднем от 0,005 мкм до 0,21 мкм преимущественно в сторону сплава 2024. При увеличении толщин исходных заготовок отклонение увеличивается незначительно.

Также показано, что при увеличении значения отношения скоростей валков и эквивалентной деформации снижается усилие прокатки (по сравнению с симметричным случаем в 1,5 – 2 раза).

**В третьей главе** осуществлялась проверка адекватности компьютерных моделей ААП листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070, 5083/2024, 6061/1070, 6061/2024 и экспериментальное исследование влияния различных параметров процесса на НДС, геометрические характеристики, энергосиловые параметры ААП, механические свойства и структуру материала.

Для исследования использовался стан асимметричной прокатки 400 лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Деформирование проводили в симметричном и асимметричном режимах. Значение отношения скоростей валков варьировалось от 1 до 5. Каждый слой формируемого композита имел начальную толщину 1 мм или 2 мм. Перед холодной прокаткой поверхность соединения алюминиевых сплавов обрабатывалась: производилась зачистка образцов для снятия верхнего слоя оксидных пленок, а также обезжиривание для удаления загрязнений. Сварка слоёв осуществлялась в очаге деформации во время деформирования. Для увеличения коэффициента трения между инструментом и металлом перед экспериментальными исследованиями прокатывали не менее 5 алюминиевых листов.

Показано, что при симметричной аккумулялирующей прокатке образцы разрушались, слои металлов не сваривались, образовывались поры посередине образцов. Асимметричная прокатка характеризуется уменьшением образования дефектов (все образцы показали хорошую свариваемость давлением). Технологическая пластичность значительно выросла – при симметричном режиме порыв металла образовался уже при значении относительного обжатия 42%, в то время как при асимметричном режиме возможно прокатывать при суммарном обжатии 77,5% за два цикла и более.

Следующим этапом была проведена проверка адекватности компьютерных моделей. Сравнивались: послойное распределение сплавов и усилия прокатки, полученное при компьютерном моделировании и при прокатке на стане 400 листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 при соотношении слоёв 2 : 1 (сплав 5083 – 1 мм, сплав 2024 – 2 мм) и конечной толщиной 1 мм. Отношение скоростей валков составило 3,3. Предварительный нагрев заготовок в печи при 380°C осуществлялся в течение 15 минут перед первым циклом обработки и в течение 8 – 10 минут перед вторым циклом. Для сравнения было произведено 10 образцов с одинаковыми начальными и граничными условиями.

Результаты представлены на рисунке 1 и в таблицах 2,3.

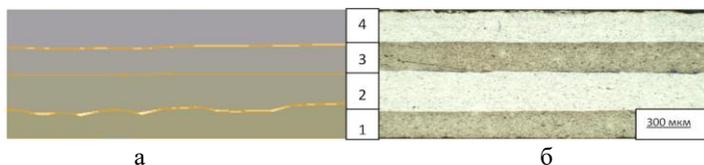


Рисунок 1 – Распределение слоев листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 – компьютерное моделирование (а) и поперечное сечение образца, макроструктура (б)

Таблица 2 – Результаты сходимости компьютерной модели и натурального эксперимента послойного распределения в листовом слоистом алюминиевом композите 5083/2024 (по толщинам слоёв)

№ слоя композита	Расчетная толщина слоя, мм	Экспериментальная толщина слоя, мм	Отклонение значений, %
1 (сплав 5083)	0,195	0,206	5,3
2 (сплав 2024)	0,319	0,325	1,8
3 (сплав 5083)	0,195	0,206	5,3
4 (сплав 2024)	0,291	0,263	9,0
Итого	1,000	1,000	0,0

Отклонение результатов компьютерной модели и натурального эксперимента составляет не более 9%, что объясняется погрешностями проведения эксперимента.

Таблица 3 – Результаты сходимости компьютерной модели и натурального эксперимента ААП листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 (по усилиям)

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

Экспериментальные значения усилий прокатки показали хорошую сходимость с расчётными значениями, что подтверждает адекватность модели.

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 на рисунке 2.

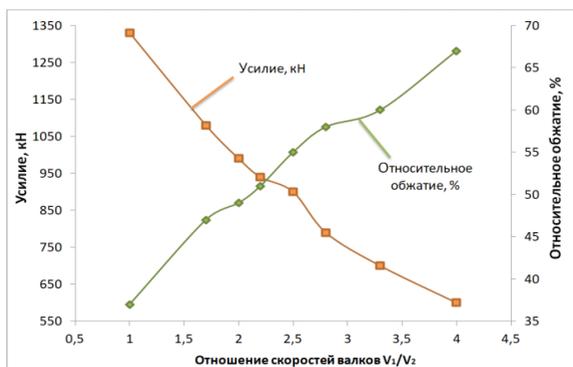


Рисунок 2 – Влияние значений отношений скоростей валков на технологическую пластичность и усилия прокатки листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024

Показано, что с увеличением отношения скоростей рабочих валков  $V_1/V_2 = 1 \dots 4$  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  $V_1/V_2 = 5$  характеризуется плавлением листового слоистого алюминиевого композита в очаге деформации. Соответственно режимы, включающие в себя значение отношения скоростей валков  $V_1/V_2 = 5$ , были исключены из дальнейших исследований.

Результаты испытаний образцов прошедших 2 цикла обработки методом ААП (на примере образцов, прокатываемых при  $V_1/V_2 = 3,3$ ) представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты механических испытаний листовых слоистых алюминиевых композитов для образцов с конечной толщиной 1 мм

Вид композита	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, ед (сторона 5083 (6061) / сторона 2024 (1070))
<b>5083/1070</b>	<b>210</b>	<b>304</b>	<b>10</b>	<b>132 / 65</b>
6061/1070	192	212	2	115 / 47
<b>5083/2024</b>	<b>215</b>	<b>333</b>	<b>12</b>	<b>130 / 106</b>
6061/2024	184	240	2	113 / 97

Следующим этапом была определена область реализации процесса ААП листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/2024 и 5083/1070, обеспечивающая 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), что подтверждено экспериментальным путём и показано на рисунке 3.

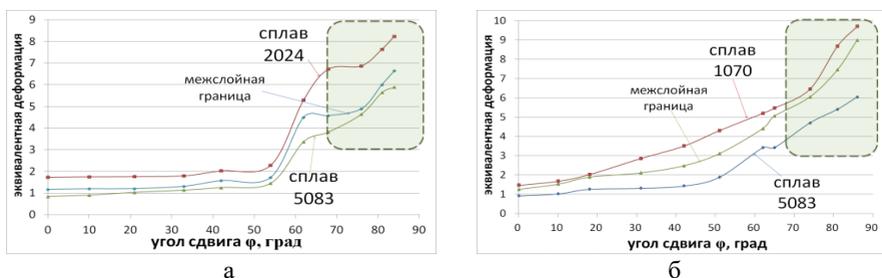


Рисунок 3 – Взаимосвязь эквивалентных деформаций и углов сдвига при ААП листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/2024 (а) и 5083/1070 (б)

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 ( $\phi > 70^\circ$ ) в этом случае не рациональны, и необходимо установить иные границы, при которых значения суммарных эквивалентных деформаций  $\epsilon$  будут превышать 4,8, а угол сдвига  $\phi$  будет более  $80^\circ$ . 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 ААП.

Для оценки изменения механических свойств в зависимости от отношения скоростей валков представлен график на рисунке 4 (на примере листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024).

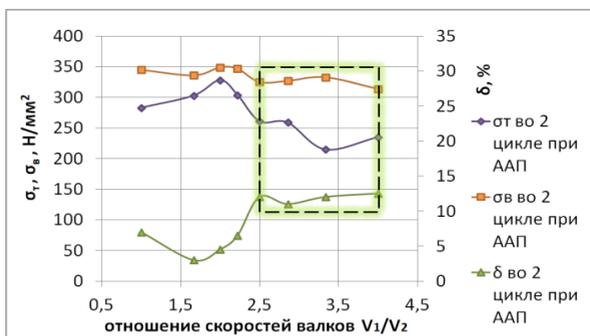


Рисунок 4 – Зависимость значений  $\sigma_t$ ,  $\sigma_b$  и  $\delta$  после второго цикла ААП от отношения скоростей валков при степенях деформации от 37% ( $V_1/V_2 = 1$ ) до 67% ( $V_1/V_2 = 4$ )

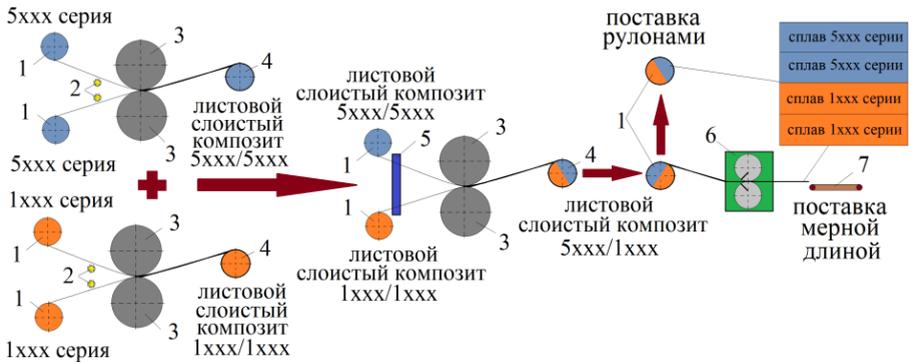
Рациональным значением отношения скоростей валков для ААП листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 является 3,3 в приемлемом диапазоне от 2,5 до 4. В данном диапазоне увеличивается не только значение относительного удлинения  $\delta$ , но и разница между значениями временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$  и пределом текучести  $\sigma_t$ , что говорит об увеличении запаса пластичности и снижения вероятности хрупкого разрушения.

**В четвёртой главе** описаны предлагаемые технические решения и технологические схемы ААП листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024, которые были разработаны как для производства продукции в виде рулонов, так и в виде листов.

Рациональные технологические режимы включают в себя: радиус рабочих валков (170 – 250 мм); исходная толщина заготовок формируемого композита (1 мм или 2 мм); количество циклов (2); значения относительных обжатий в 1 и 2 циклах аккумуляющей прокатки (50 – 67% для 5083/1070 и 50 – 65% для 5083/2024 до конечных толщин 0,7 – 1,5 мм); значения отношений скоростей валков (в зависимости от толщин заготовок и значений относительных обжатий в

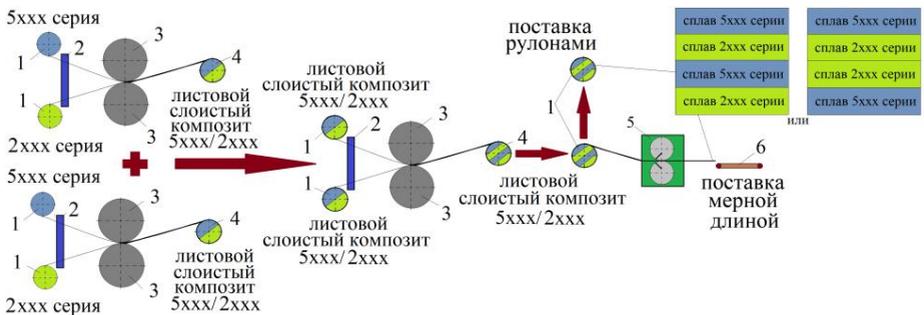
минимальных пределах от 1,25 до 3,5); температура нагрева и время выдержки в печи при тёплой прокатке (380° С в течение 5 – 8 минут для 5083/1070 и 380° С в течение 15 минут перед первым циклом, 8 – 10 минут перед вторым циклом для 5083/2024).

Данные режимы прокатки обеспечивают попадание в область высоких значений прочности и технологической пластичности (когда  $\epsilon > 3$  и  $\varphi > 70^\circ$ ). При этом температура деформационного разогрева не достигнет критического значения. Предлагаемые схемы технологического процесса ААП листовых слоистых алюминиевых композитов представлены на рисунках 5 и 6.



1 – разматыватели; 2 – щётки; 3 – валки; 4 – моталка; 5 – печь;  
6 – ножницы; 7 – транспортер листов

Рисунок 5 – Технологическая схема процесса производства алюминиевых листовых слоистых композитов 5xxx/1xxx



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

Рисунок 6 – Технологическая схема процесса производства алюминиевых листовых слоистых композитов 5xxx/2xxx

Отличием предложенной технологической схемы производства листовых

слоистых алюминиевых композитов является возможность отгрузки продукции не только в виде листов, но и в виде рулонов, что позволит существенно повысить производительность процесса. Сочетание 5xxx и 1xxx серий позволит с одной стороны получить достаточный уровень прочности, 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. Сочетание 5xxx и 2xxx серии позволит получить удовлетворительное качество поверхности за счёт сплава 5083, сплав 2024 применяется в конструкциях, в которых требуется высокое значение коэффициента вязкостного разрушения, более того в совокупности они лучше выдерживают эксплуатационные нагрузки.

Исходя из разработанных технологических схем, был предложен ряд новых технических решений. Одно из таких решений (патент РФ №2699473 и евразийский патент №039071) заключается в проведении процесса холодной прокатки с отношением скоростей валков, которое зависит от исходной и конечной толщины материала, диаметров валков и эмпирического коэффициента ( $k = 0,95 - 0,98$ ). По данному техническому решению будет обеспечиваться одновременное повышение прочностных и пластических свойств на 5 – 10%.

Еще два предложения (патенты РФ №2756086 и № 2762696) касаются применения предварительной механической обработки поверхности одного из слоёв биметалла или слоистого материала с формированием рельефа в поперечном направлении к оси прокатки. При ААП чрезвычайно важным является обеспечение предотвращения сдвига одного листа относительно другого в горизонтальной плоскости, что может привести к отсутствию соединения между сплавами, либо частичному свариванию и завороту передней части заготовки по типу дефекта «серповидность». Для решения этой проблемы предложено использовать предварительную механическую обработку 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. Прокатка должна осуществляться с обжатием 65 – 80% за один проход с применением термообработки.

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».

**В заключении** показаны основные выводы по диссертационной работе.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

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 ( $\sigma_b$  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  $\delta$  (12%) и отношение временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$  к пределу текучести  $\sigma_T$  (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».

**Основные результаты диссертационной работы опубликованы в изданиях:**

#### **Рецензируемые ВАК:**

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

2) 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.

#### **Системы Scopus и Web of Science:**

3) 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.

4) 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.

5) Pesin, A. The effect of speed asymmetry on the strain state in aluminium bimetals during accumulative rolling / A. Pesin, D. Pustovoitov, **O. Biryukova** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. – vol. 447 – PP. 1 –5.

6) 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. Ilyina // Procedia Manufacturing. – 2020. – vol.50 – PP. 579–583.

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

**РИНЦ:**

8) 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.

9) 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.

10) 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 3<sup>rd</sup> International Youth Workshop Magnitogorsk Rolling Practice 2018 по материалам 3 молодежной научно-практической конференции, 2018. – №3.–С. 3-5.

11) 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.

12) 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.

13) 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.

14) 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.

15) Бирюкова, О.Д. Анализ энергосиловых параметров процесса асимметричной аккумулирующей прокатки биметаллических алюминиевых композитов / **О.Д. Бирюкова**, Д.О. Пустовойтов // Туполевские чтения, Казань, 2019. – С. 235-239.

16) 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.

17) Возможности стана 400 асимметричной прокатки и роботизированного комплекса Kuka 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.

**Патенты:**

18) 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.

19) 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.

20) 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.

21) 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.