

На правах рукописи



Трибунский Александр Викторович

**ФОРМИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ
В ТОНКИХ ЛИСТАХ И ЛЕНТАХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ШТАМПУЕМОСТИ**

2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара – 2025

Работа выполнена на кафедре технологии металлов и авиационного материаловедения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва»

Научный

руководитель: **Носова Екатерина Александровна**
Доктор технических наук, доцент

Официальные

оппоненты: **Белов Николай Александрович**
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский технологический
университет "МИСиС"», главный научный сотрудник
кафедры обработки металлов давлением, г. Москва

Оглодков Михаил Сергеевич

кандидат технических наук, заместитель начальника научно-исследовательского отдела ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «26» июня 2025 г., в 14 час. 00 мин. на заседании объединённого диссертационного совета 99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 99.2.039.02.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета, к.т.н., доцент



А.Р. Луц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Алюминий и алюминиевые сплавы широко используются в машиностроении, строительстве и других промышленных отраслях. В последние годы возрос интерес к алюминиевым сплавам в виде листов и лент толщиной менее 1 мм, которые востребованы для изготовления гнутых конструкций. Однако при гибке алюминиевых листов и лент толщиной менее 1 мм на поверхности изгиба появляются дефекты, приводящие к отслоениям покрытий и ухудшающие декоративность и функциональность. Чаще всего проявление рельефа на сгибе можно наблюдать на изделиях, изготовленных из листов толщиной менее 0,35 мм. Причины такого поведения в настоящий момент изучены слабо, основными из них могут быть особенности структуры, формируемой при получении листов и лент из алюминиевых сплавов, которая зависит от химического состава и технологических режимов прокатки и термической обработки.

Немаловажной задачей при повышении штампуемости алюминиевых сплавов в гибочных операциях является количественная оценка этой способности. Для решения этого вопроса существуют стандартные способы оценки (ГОСТ 14019—80. Металлы. Методы испытания на изгиб) и технологические пробы (на перегиб), имеющие свои недостатки, поскольку критерием пригодности материала в обоих случаях является отсутствие трещин на поверхности изгиба, в то время как наличие волн в существующих способах не является дефектом, но является дефектом в соответствии с требованиями конструкторов изделий или заказчиков продукции.

В связи с этим, предлагаемая работа, направленная на изучение влияния состава, степени деформации при холодной прокатке, температуры отжига на структуру, механические и технологические свойства тонких алюминиевых листов из сплавов А5, 3005 и 5182 с целью формирования рациональных механических и технологических свойств и структуры тонких листов и лент деформируемых алюминиевых сплавов, применяемых для получения изделий методами гибки, является актуальной.

Основная цель работы – повышение пригодности тонких алюминиевых листов из сплавов А5, 3005, 5182 к проведению операции гибки за счёт выявления закономерностей, определяющих влияние состава, термической и деформационной обработки на структуру, кристаллографическую текстуру, механические и технологические свойства.

Для достижения поставленной цели были поставлены **задачи**:

1. Изучение особенностей формирования структуры тонких листов и лент из деформируемых алюминиевых сплавов и их влияние на способность к гибочным операциям;
2. Определение влияния различных видов отжига на появление трещин при гибке листов из технического алюминия А5 и деформируемых алюминиевых сплавов 3005 и 5182 толщиной менее 1,0 мм;

3. Экспериментальное определение зависимости технологических и механических свойств листового алюминиевого сплава 3005 от содержания марганца и магния в составе;

4. Выявление закономерности преобразования кристаллографической текстуры в тонких образцах из технического алюминия А5 и алюминиевых сплавов 3005, 5182 в результате деформационной и термической обработки;

5. Изучение влияния кристаллографической текстуры в тонких образцах из технического алюминия А5 и алюминиевых сплавов 3005, 5182 на способность листов толщиной менее 1,0 мм к гибочным операциям.

Научная новизна

1. Установлены особенности структуры и кристаллографической текстуры листов толщиной менее 1,0 мм из сплавов А5, 3005, 5182 и их влияние на способность к гибочным операциям и на штампуемость.

2. Установлена количественная взаимосвязь содержания химических элементов (марганца и магния) и условий термической обработки для формирования требуемых механических и технологических свойств и структуры в тонких листах из алюминиевого сплава 3005. Исследования показали, что изменения в химическом составе сплава могут значительно влиять на его механические свойства. В частности, уменьшение содержания марганца с 1,15% до примерно 1,07-1,12% и одновременное увеличение уровня магния с 0,37% до 0,41-0,45% приводит к заметным изменениям в свойствах сплава: уменьшение предела прочности и предела текучести на средний показатель в 7,4%, а также увеличение относительного удлинения на 3,5%.

3. Определено, что при термической обработке листов толщиной 0,25 мм, 0,46 мм и 0,82 мм из сплава 3005 происходит двукратное увеличение бестекстурной составляющей, с аналогичным уменьшением объемных долей других кристаллографических текстур.

4. На основании анализа дефектов наружной поверхности в месте изгиба разработана методика количественной оценки способности тонких листов и лент из алюминиевых сплавов к гибочным операциям.

Практическая значимость работы:

1. Определены особенности влияния условий отжига листового алюминиевого сплава 3005 на образование трещин при гибке. Более высокие показатели при изгибе с углом 180 градусов имеет металл, отожженный в садочных печах, по сравнению с металлом, обработанном на ЛНТО. Определено, что в результате отжига способность к гибочным операциям и штампуемость возрастает, но с уменьшением толщины листа от 0,92 до 0,25 мм эта способность к восстановлению штампуемости после отжига снижается в 1,5 раза.

2. Предложен способ количественной оценки штампуемости в зависимости от рельефа поверхности изгиба, который позволяет выявить благоприятные режимы деформации и отжига для обеспечения высокой штампуемости тонких листов и лент из алюминиевых сплавов.

3. Согласно полученным актам практического использования результатов диссертации, разработанные режимы прокатки и отжига сплавов А5, 3005 и 5182

используются как справочные данные при производстве продукции в АО «АлТи Фордж» и АО «Самарский металлургический завод».

Объект исследования

Алюминиевые сплавы марок А5, 3005 и 5182

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты изучения влияния химического состава (содержание марганца и магния) и условий термической обработки на механические и технологические свойства алюминиевого сплава 3005;

2. Результаты изучения эволюции структуры и свойств листовых образцов толщиной менее 1,0 мм из сплавов 3005, 5182 и А5 в зависимости от степени обжатия при холодной прокатке, температуры и способа отжига;

3. Результаты изучения влияния толщины металла и кристаллографической текстуры листов из алюминиевых сплавов 3005, 5182 и А5 на способность к гибочным операциям.

Достоверность полученных результатов исследования

Обеспечивается воспроизводимостью результатов опытов, согласованием их с известными литературными данными, применением комплекса современных методов и приборов анализа структуры, текстуры, фазового состава и механических свойств.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на конференциях: XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов – молодых ученых (г. Екатеринбург, 2017 г.); VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Наследственность в литейно-Металлургических процессах» (г. Самара, 2018 год); Международная молодёжная научная конференция "XV Королёвские чтения", посвящённая 100-летию со дня рождения Д. И. Козлова (г. Самара, 2019 год); Всероссийский научно-технический форум по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова (г. Самара, 2024 год).

Научные публикации

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 9 печатных работах, в том числе 4 статей опубликовано в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.6.17 Материаловедение. Зарегистрирована электронная база данных.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, 3 приложений и списка использованных источников в количестве 105 наименований. Работа выполнена на 153 страницах, содержит 75 рисунков, 12 таблиц и 6 формул.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проанализирована степень разработанности темы, произведён обзор алюминиевых сплавов систем алюминий-марганец и алюминий-магний, ранее проводимых исследований и существующих литературных данных касательно свойств данных сплавов, результатов их обработки и существующих областей применения. Также в главе представлен анализ современных достижений в области исследования влияния состава и структуры листовых алюминиевых сплавов на повышение их способности к операциям гибки и штампуемость.

Во второй главе приведены материалы и описания методик экспериментальных исследований.

При проведении исследований применялись образцы в виде листов из алюминиевого сплава 3005, поставляемые по химическому составу согласно EN 573-3 и механическим свойствам согласно EN 485-2. Образцы металла толщиной 0,25мм, 0,46мм и 0,82мм отбирались после холодной прокатки со степенью деформации 92,9%, 88,5% и 85,1 % соответственно. Выбор объектов исследования связан с тем, что указанные листовые деформируемые сплавы широко используются в строительстве и отделке (декоративные и защитные профилированные облицовочные материалы).

Образцы исследовались в холоднокатаном и отожжённом состояниях. Режимы отжига выбирались на основании традиционных рекомендаций термической обработки. Отжиг образцов выполнен в садочных воздушно-циркуляционных печах и на линии непрерывной термообработки (ЛНТО) при температуре 270°C в течение 1 часа.

Для практического определения влияния легирующих элементов (магния и марганца) на механические и технологические свойства алюминиевых сплавов выполнен анализ химического состава листовой продукции производства АО «СМЗ» из сплава 3005 с 2015 по 2024 год. Анализ показал необходимость снижения содержания марганца на $0,03 \div 0,8\%$ и повышения содержания магния на $0,04 \div 0,8\%$ относительно средних значений.

Количественную оценку штампуемости проводили с помощью балльной системы оценки рельефа поверхности изгиба, для этого был произведён визуальный осмотр места изгиба образцов металла толщиной 0,25мм, 0,46мм и 0,82мм в холоднокатаном и отожжённом состояниях с применением лупы, стереомикроскопа и USB-камеры с увеличением до 20 крат. Методика заключалась в анализе не менее 50 поверхностей изгиба для определения основных повторяющихся типов рельефа поверхности изгиба. Для каждого типа рельефа определены условные баллы штампуемости. Принято, что максимально возможный балл штампуемости (10 баллов) это рельеф с гладкой поверхностью в месте изгиба, где отсутствуют дефекты «апельсиновая корка» и трещины, а минимальный балл (0 баллов) – рельеф со сквозными трещинами по всему изгибу. При этом волнистости с меньшей высотой волны будет присвоен более высокий балл, чем для волнистости с большей высотой волны, а наличие трещин будет приводить к снижению балла штампуемости.

Текстурные измерения в виде построения полюсных фигур проводили на образцах, вырезанных из листов, в месте изгиба. Плоскость съёмки полюсных фигур была параллельна плоскости прокатки. Текстуры были исследованы методом «на отражение»

с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в $\text{CuK}\alpha$ -излучении, диапазоны углов наклона α ($0 \div 70^\circ$) и поворотов β ($0 \div 360^\circ$) с шагом по α и $\beta = 5^\circ$. Далее рассчитывались прямые и обратные полюсные фигуры для трех взаимно перпендикулярных направления прокатки (НП).

В третьей главе приведены результаты моделирования в программе Deform процесса изгиба Т0 с углом изгиба 180 градусов. При изгибе тонких алюминиевых лент с углом изгиба 180 градусов образцы толщиной менее 0,46 мм ведут себя иначе по сравнению с образцами толщиной от 0,46 до 0,92 мм. В месте изгиба у более тонких образцов образуются трещины и возникает волнистый рельеф поверхности изгиба - дефект в виде «апельсиновой корки». Полученные в результате моделирования в Deform значения максимальных напряжений при изгибе Т0 образцов алюминиевого сплава 3005 толщиной 0,25мм (с разрушением) и толщиной 0,82мм (без разрушения) представлены на рисунке 1.

Результаты моделирования подтвердили практические эксперименты. Моделирование процесса гибки с углом 180 градусов в программе Deform позволило установить, что с уменьшением толщины алюминиевой ленты от 0,92мм до 0,25мм происходит уменьшение очага деформации от 2,9 до 1,4 мм (рисунок 2а), при том, что максимальные растягивающие напряжения в металле возрастают до от 209 до 222 МПа (рисунок 2б), что превышает предел прочности отожжённого алюминиевого сплава 3005 и, вероятнее всего, приводит к возникновению трещин и волнистого рельефа поверхности изгиба.

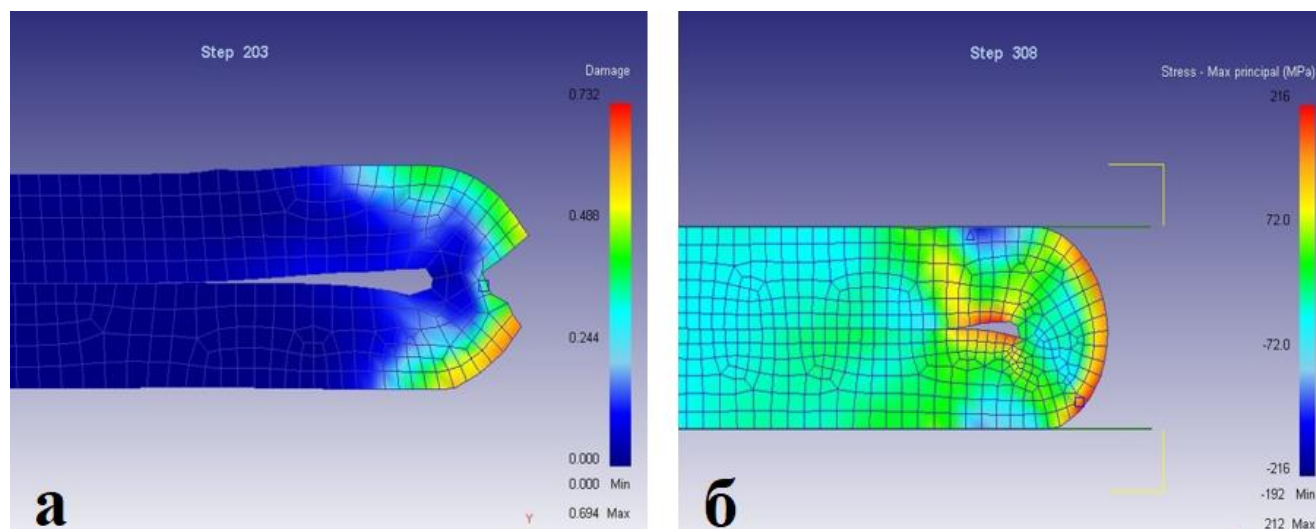


Рисунок 1 – Максимальное напряжение при толщине 0,25 мм (а) и 0,82 мм (б)

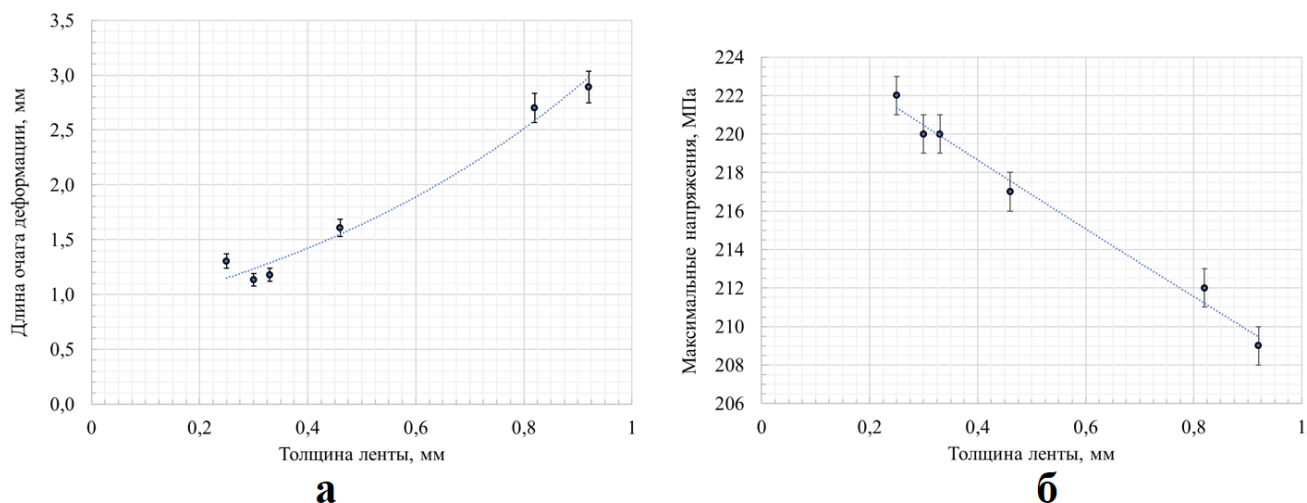


Рисунок 2 – Длина очага деформации (а) и максимальные напряжения в поверхностном слое (б)

В четвертой главе приведены результаты изучения влияния степени пластической деформации, режимов и способа термической обработки на механические свойства листовых алюминиевых сплавов 3005, 5182 и технического алюминия А5.

Построены графики изменения механических свойств сплавов А5, 3005 и 5182 в зависимости от степени деформации, после отливки слитков, горячей и холодной прокатки, отжига в садочных печах и на линии непрерывной термообработки. Результаты представлены на рисунках 3-5.

Увеличение степени деформации приводит к повышению прочности и снижению пластичности. После отжига степень деформации практически не влияет на прочностные и пластические характеристики.

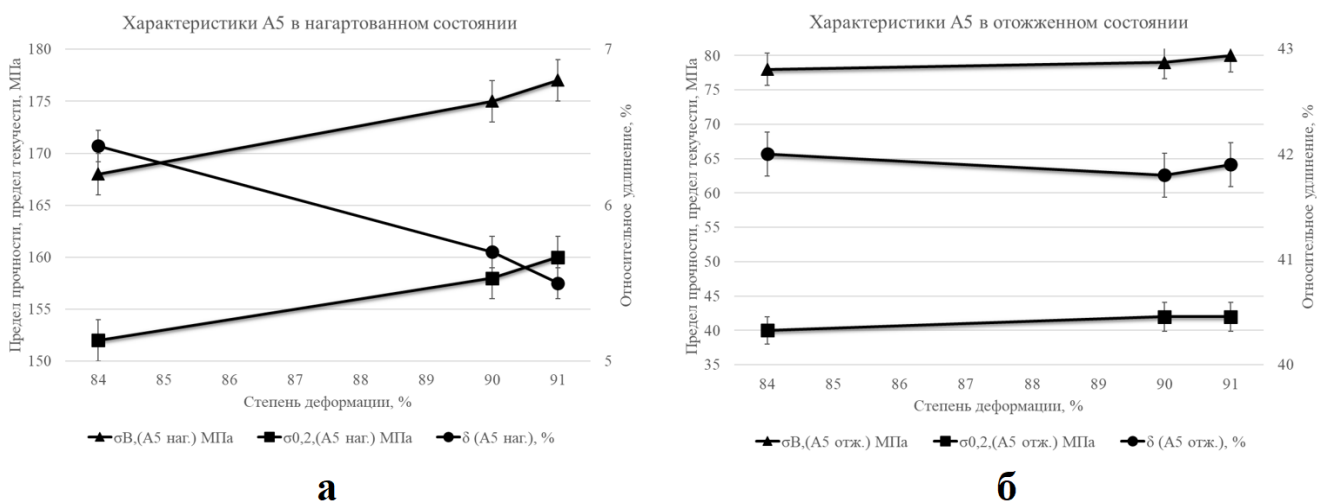
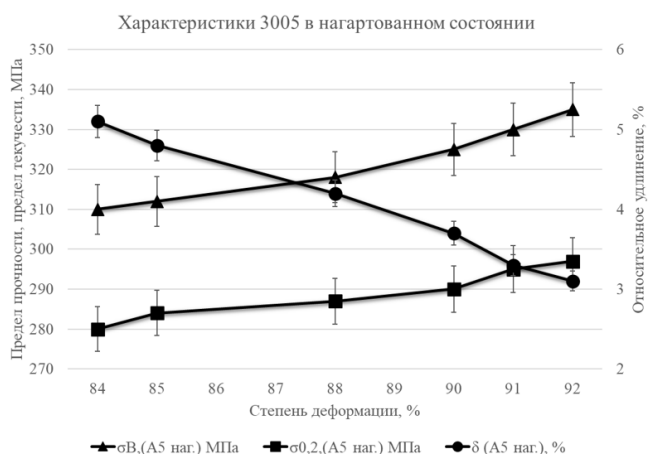
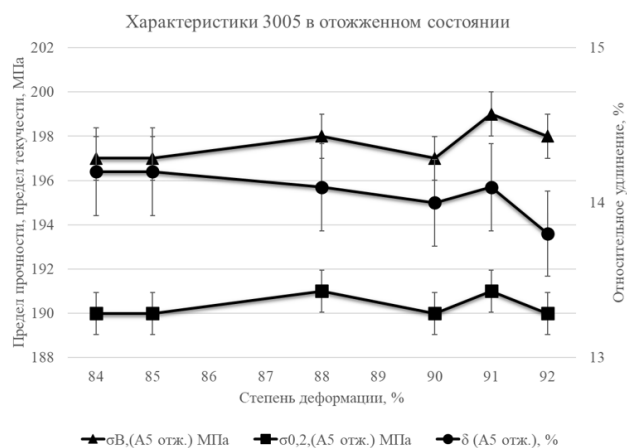


Рисунок 3 – Механические свойства сплава А5 в нагартованном (а) и отожженном (б) состояниях

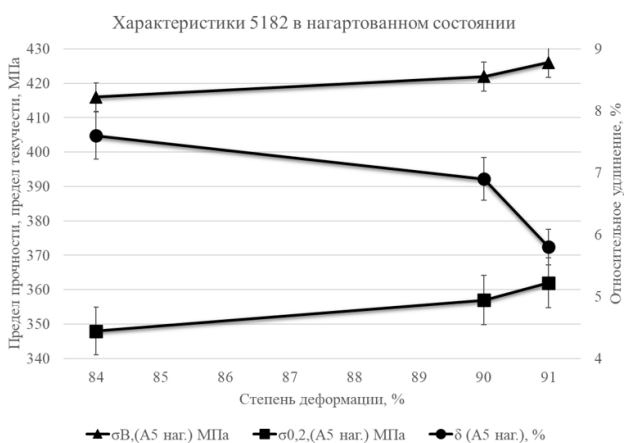


а

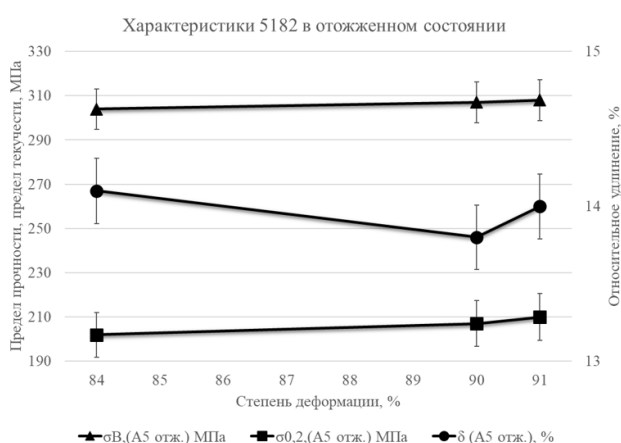


б

Рисунок 4 – Механические свойства сплава 3005 в нагартованном (а) и отожженном (б) состояниях



а



б

Рисунок 5 – Механические свойства сплава 5182 в нагартованном (а) и отожженном (б) состояниях

Влияние способа отжига на механические свойства алюминиевых лент из сплава 3005 толщиной 0,25 мм, 0,33 мм, 0,46 мм и 0,82 мм представлено на рисунке 6, из которого видно, что проведение отжига на линии непрерывной термообработки (ЛНТО) приводит к меньшим примерно в 2,5...3 раза значениям относительного удлинения и на 5% более высоким показателям предела прочности и предела текучести, чем после отжига в садочной печи. Эти наблюдения сохраняются для образцов всех толщин от 0,25 до 0,82 мм, влияния степени деформации на показатели механических свойств не выявлено.

Усредненные механические свойства и рельеф изгиба при $\angle 180^\circ$ металла, полученного после термической обработки опытных рулонов с изменённым содержанием магния и марганца (рулоны номера 3, 4, 7 и 8) и со стандартным серийным на АО «СМЗ» химическим составом (рулоны номера 1, 2, 5 и 6) в садочных печах и на ЛНТО представлены на рисунке 7.

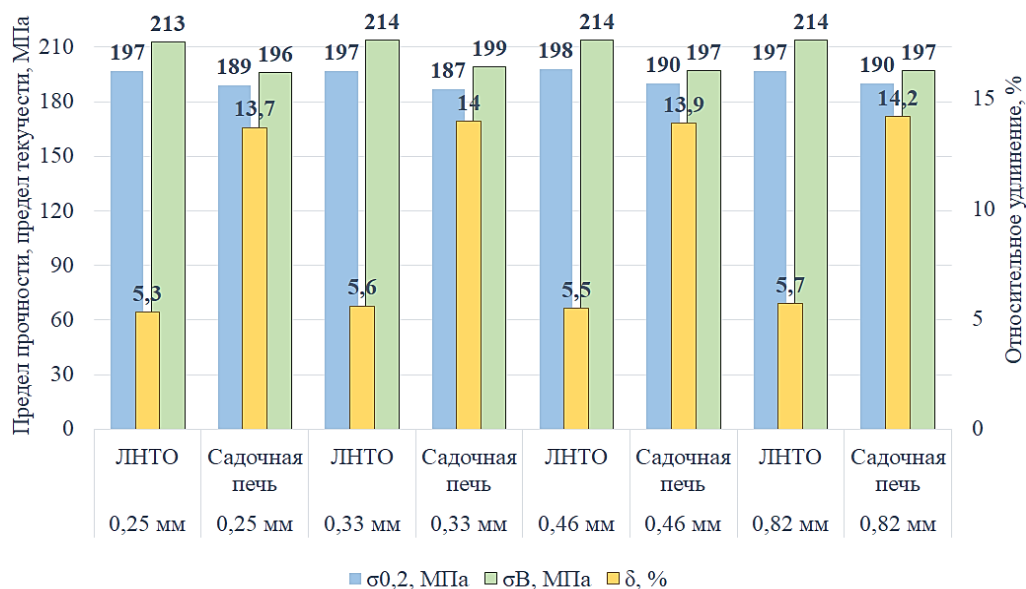


Рисунок 6 – Влияние способа отжига на механические свойства лент из сплава 3005

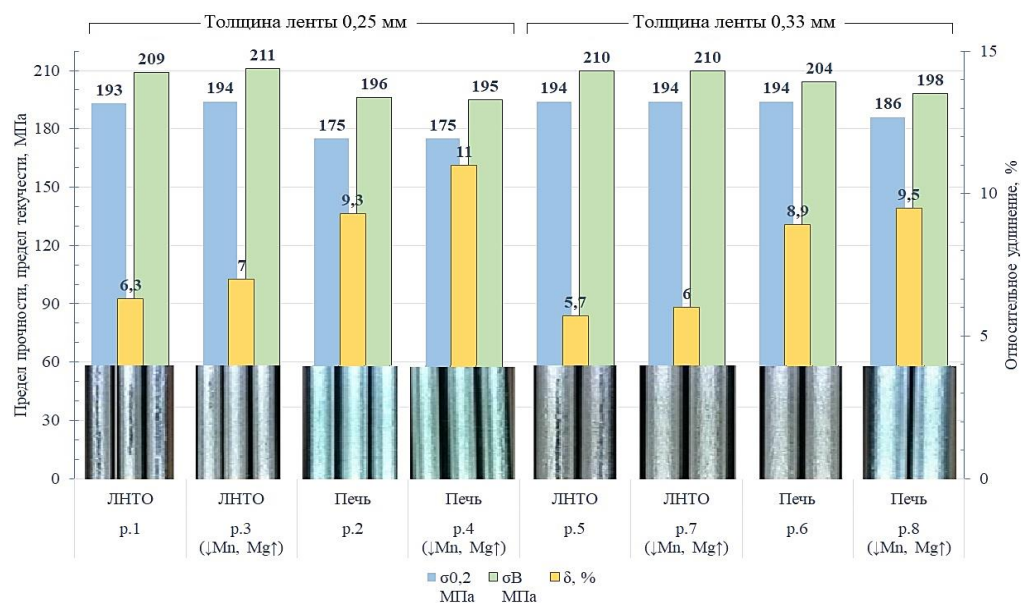


Рисунок 7 – Влияние магния и марганца на механические свойства ленты из сплава 3005 толщиной 0,25 и 0,33 мм

Проведение отжига ленты толщиной 0,25мм и 0,33мм на линии непрерывной термообработки приводит к получению пониженных в 1,4...1,5 раза значений относительного удлинения по сравнению с отжигом в садочной печи, что сопровождается появлением трещин в месте изгиба при последующих испытаниях на перегиб.

Для рулонов, отожженных в садочных печах, прочностные и пластические характеристики полученного металла отличаются от средних значений для сплава 3005: для ленты толщиной 0,25 мм предел прочности ниже на 20 МПа, предел текучести ниже на 15 МПа, относительное удлинение выше на 4%; для ленты толщиной 0,33 мм предел прочности ниже на 5 МПа, предел текучести ниже на 10 МПа, относительное удлинение выше на 3%. При этом на рулонах номера 1 и 5 (со стандартным средним химическим

составом) обнаружены микротрещины в месте изгиба, а на рулонах 3 и 7 дефектов поверхности изгиба нет.

Микроструктура образцов после прокатки и отжига алюминиевых сплавов А5, 3005 и 5182 представлена на рисунках 8-10. Отжиг, проведенный на ЛНТО, способствует началу рекристаллизации, но в целом сохраняет первоначальную деформированную структуру. В отличие от этого, обработка в садочной печи обеспечивает более завершённый процесс рекристаллизации, что видно на структуре металла, ставшей частично рекристаллизованной.

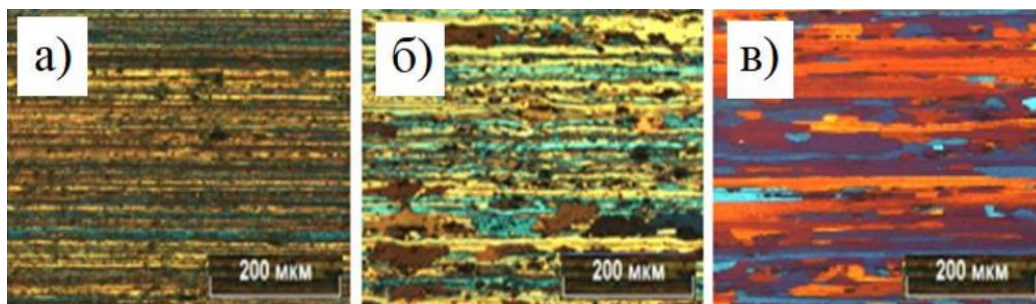


Рисунок 8 – Микроструктура сплава 3005 толщиной 0,25 мм после: а – холодной прокатки, б – после отжига на ЛНТО, в – после отжига в садочной печи, x100

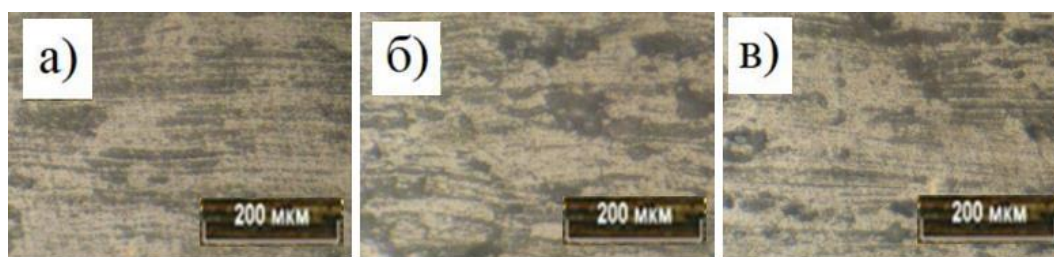


Рисунок 9 – Микроструктура сплава 5182 толщиной 0,25 мм после: а – холодной прокатки, б – после отжига на ЛНТО, в – после отжига в садочной печи, x100

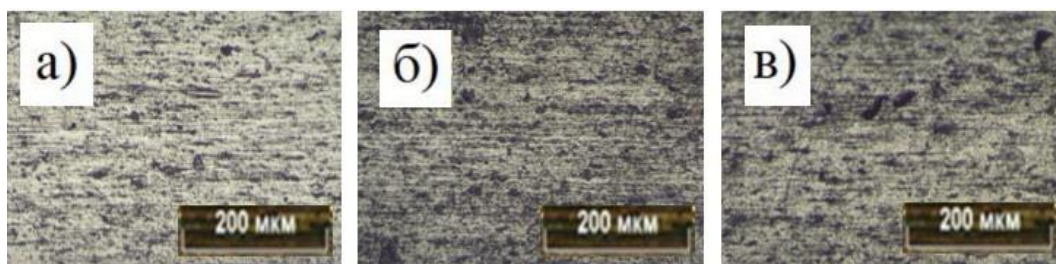


Рисунок 10 – Микроструктура сплава А5 толщиной 0,25 мм после: а – холодной прокатки, б – после отжига на ЛНТО, в – после отжига в садочной печи, x100

Пятая глава посвящена изучению влияния кристаллографической текстуры и условий деформационной и термической обработок на технологические свойства алюминиевых сплавов А5, 3005, 5182.

На рисунке 11 представлены диаграммы ранжирования полюсной плотности основных ориентировок кристаллографических текстур образцов из сплава 3005

толщиной 0,25 мм, 0,46 мм и 0,82 мм после холодной прокатки (а) и отжига (б) в порядке убывания их объемных долей. В холоднокатаном состоянии определяющую долю, занимающую более 80% от суммы полюсных плотностей, занимают 3 ориентировки: бестектурная, $S''^2(341)<4-58>$ и $Bs'(110)<1-12>$, а на отожженных образцах ключевую роль, составляющую 80% играют бестектурная составляющая и ориентировка $S''^2(341)<4-58>$.

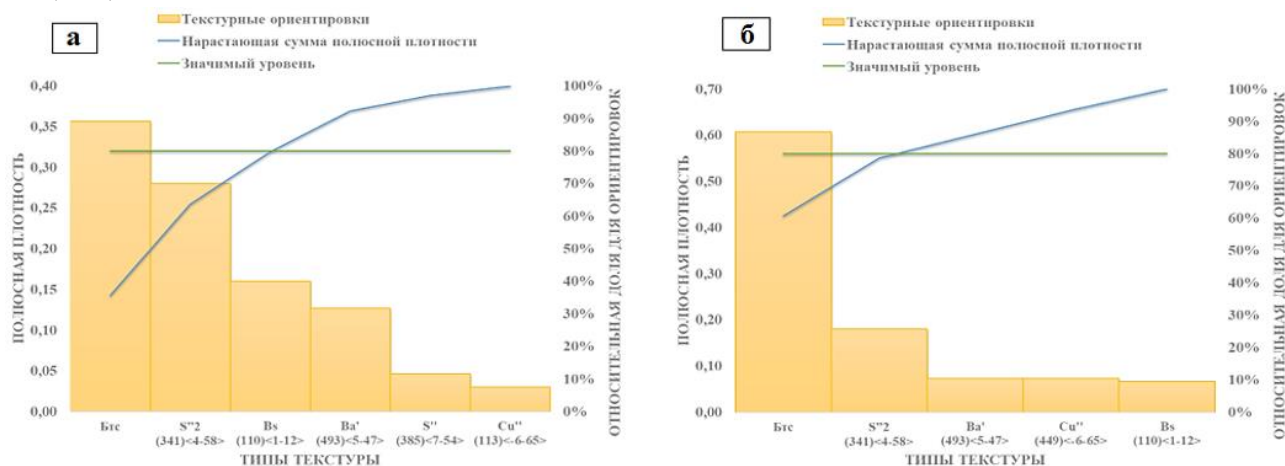


Рисунок 11 – Ранжирование основных ориентировок текстуры образцов из сплава 3005 толщиной 0,25мм, 0,46мм и 0,82мм после холодной прокатки (а) и отжига (б)

С уменьшением толщины образцов после холодной прокатки доли бестектурной составляющей и текстуры $S''^2(341)<4-58>$ практически не меняются, доля текстуры $Ba'(493)<5-47>$ незначительно уменьшается, а текстур $Bs(110)<1-12>$ увеличиваются.

Снижение почти до нуля доли ориентировки $S''(385)<7-54>$ и рост объемной доли текстуры $Bs(110)<1-12>$ при толщине листа 0,25 мм приводит к снижению способности к гибочным операциям в 2,8 раза. Для образцов после отжига, с уменьшением толщины образцов также практически не меняются доли бестектурной составляющей и текстуры $S''^2(341)<4-58>$, доля текстуры $Ba'(493)<5-47>$ уменьшается, а текстур $Cu''(449)<6-65>$ увеличиваются. Стоит отметить, что после отжига полностью пропала доля текстуры $S''(385)<7-54>$, а доля $Bs(110)<1-12>$ резко снижается по сравнению с холоднокатаным состоянием на образцах всех исследуемых толщин. Аналогичные наблюдения выявлены для двух других исследуемых сплавов А5 и 5182.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В рамках исследования была использована программа DEFORM-3D для моделирования процесса гибки алюминиевых листов под углом 180 градусов. Это позволило выявить критические параметры, такие как максимальные напряжения и длина зоны очага деформации на внешней поверхности образцов. В ходе эксперимента было установлено, что при толщине листов от 0,25 до 0,92 мм, разрушение материала происходит, когда напряжение в поверхностном слое достигает значения свыше 220 МПа, при этом длина зоны очага деформации не превышает 1,3 мм. Данные результаты подчеркивают важность точного контроля параметров процесса гибки для предотвращения разрушения материала.

2. Установлены особенности микроструктуры тонких листов и лент, влияющие на способность листовых материалов к операциям гибки и штампуемости. Уменьшение толщины листов от 1,0 мм до 0,2 мм приводит к уменьшению толщины зерна до 10 мкм, увеличению его длины, что способствует снижению относительного удлинения, уменьшению балла штампуемости за счёт образования складок и трещин на наружной поверхности гнутых образцов. Значительное влияние на способность к гибке оказывает проведение отжига: для образцов толщиной 0,46 мм и 0,82 мм после отжига способность к гибке увеличивается в 3 раза, для образцов толщиной 0,25 мм – в 2 раза. Увеличение степени обжатия от 85% до 92% при холодной прокатке приводит к снижению штампуемости в 1,35 раза. Установлено, что с уменьшением толщины образцов от 0,82 до 0,25 мм происходит уменьшение балла штампуемости около 2 раз. В результате отжига штампуемость возрастает, но с уменьшением толщины листа эта способность к восстановлению штампуемости снижается в 1,5 раза.

3. Для рулонов, отоженных в садочных печах, прочностные и пластические характеристики полученного металла отличаются от средних значений для сплава 3005 для ленты толщиной 0,25 мм предел прочности ниже на 20 МПа, предел текучести ниже на 15 МПа, относительное удлинение выше на 4%; а для ленты толщиной 0,33 мм предел прочности ниже на 5 МПа, предел текучести ниже на 10 МПа, относительное удлинение выше на 3%. После отжига на ЛНТО сохраняется деформированная структура, но уже с начальной стадией рекристаллизации. Структура металла, отоженного в садочной печи, частично рекристаллизованная.

4. На образцах толщиной 0,25 и 0,33 мм сплава 3005 со стандартным средним химическим составом после прокатки, отжига на ЛНТО и испытаний на перегиб обнаружены микротрещины в месте изгиба, а на алюминиевых образцах со сниженным содержанием марганца на $0,03 \pm 0,8\%$ и повышенным содержанием магния на $0,04 \pm 0,8\%$ относительно средних значений дефектов поверхности изгиба нет. Отжиг в садочных печах привел к получению более высоких значений пластичности и меньших значений прочностных характеристик по сравнению с отжигом на ЛНТО для всех температур отжига ($240\text{--}270^\circ\text{C}$) и содержания магния и марганца. Относительное удлинение образцов толщиной 0,25 мм повышается равномерно во всем интервале температур отжига, а для образцов толщиной 0,33 мм с повышенным содержанием магния и марганца значительный рост относительного удлинения наблюдается после отжига в интервале температур $245\text{--}260^\circ\text{C}$ на ЛНТО. При отжиге в садочных печах повышение пластичности наблюдается при меньших температурах ($240\text{--}250^\circ\text{C}$).

5. Полученные результаты показывают, что температура отжига играет ключевую роль в достижении оптимальных механических и технологических характеристик алюминиевых сплавов. Например, для сплавов А5 и 3005 рекомендуемый температурный диапазон отжига составляет $270 \pm 5^\circ\text{C}$, в то время как для сплава 5182 этот диапазон немного выше — $280 \pm 5^\circ\text{C}$. Эти выводы были подтверждены не только результатами проведенных экспериментов, но и данными, опубликованными в научной литературе. Таким образом, разработанные режимы обработки позволяют значительно улучшить качество алюминиевых изделий, обеспечивая их надежность и долговечность в процессе

эксплуатации. Эти результаты имеют важное значение для промышленности, поскольку позволяют оптимизировать процессы производства и повысить конкурентоспособность продукции на рынке.

6. Предложен способ количественной оценки способности тонких алюминиевых листов к гибке с углом 180° в зависимости от рельефа поверхности изгиба, который позволил количественно оценить и выявить изменение пригодности тонких листов к гибочным операциям в зависимости от степени холодной пластической деформации и отжига. Для каждого типа рельефа определены условные баллы штампуемости. Принято, что максимально возможный балл штампуемости в 10 баллов это рельеф с гладкой поверхностью в месте изгиба, где отсутствуют дефекты «апельсиновая корка» и трещины, а минимальный балл штампуемости в 0 баллов – рельеф со сквозными трещинами по всему изгибу.

7. Проведён анализ кристаллографической текстуры листов из алюминиевого сплава 3005 в холоднокатаном и отожжённом состояниях. При отжиге листов толщиной от 0,25 мм до 0,82 мм, происходит почти двукратное увеличение бестекстурной составляющей с 35% до 60%. Распределение полюсной плотности в порядке убывания для холоднокатаных образцов – бестекстурная составляющая, $S''^2(341)\langle 4-58 \rangle$, $Ba'(493)\langle 5-47 \rangle$, $Bs(110)\langle 1-12 \rangle$, $S''(385)\langle 7-54 \rangle$, $Cu'(113)\langle -6-65 \rangle$, для отожжённых образцов – бестекстурная составляющая, $S''^2(341)\langle 4-58 \rangle$, $Ba'(493)\langle 5-47 \rangle$, $Cu''(449)\langle -6-65 \rangle$, $Bs(110)\langle 1-12 \rangle$. Выявлены текстуры, оказывающие наибольшее влияние на способность листов к гибочным операциям. Установлено, что в холоднокатаном состоянии определяющую долю, занимающую более 80% от суммы полюсных плотностей, занимают 3 ориентировки: бестекстурная, $S''^2(341)\langle 4-58 \rangle$ и $Bs'(110)\langle 1-12 \rangle$, а на отожженных образцах ключевую роль, которая составляет 60% от объемной доли всех кристаллографических текстур, играет бестекстурная составляющая. Выявлено, что исчезновение ориентировки $S''(385)\langle 7-54 \rangle$ и рост объемной доли текстуры $Bs(110)\langle 1-12 \rangle$ с 0,8 до 1,2 на холоднокатаных листах толщиной 0,25 мм приводит к снижению способности к гибочным операциям в 2,8 раза. Стоит отметить, что кристаллографическая текстура $S''(385)\langle 7-54 \rangle$ полностью исчезает после отжига, а $Bs(110)\langle 1-12 \rangle$ снижается в 2 раза по сравнению с холоднокатаным состоянием, что приводит к росту штампуемости с 5 до 9 баллов. Аналогичные наблюдения выявлены для двух других исследуемых сплавов А5 и 5182.

Основное содержание диссертации представлено в следующих работах:

Публикации в ведущих рецензируемых журналах:

1. Трибунский, А. В. Влияние кристаллографической текстуры на поведение листов из алюминиевого сплав 3005 при изгибе / А. В. Трибунский, Е. С. Читнаева, А. Ш. Хисраов, А. С. Вышкина // Ползуновский вестник. – 2020. – №2. – С. 160-164

2. Трибунский, А. В. Исследование влияния кристаллографической текстуры на способность листов из алюминиевого сплава 3005 к гибочным операциям / А. В. Трибунский // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2024. – №1. – С. 111–119.

3. Трибунский, А. В. Исследование кристаллографической текстуры тонких лент

из алюминиевых сплавов АД0, АМЦ и Д16 / Е.А. Носова, В.А. Разживин, А.А. Кузина, А.В. Трибунский // Ползуновский вестник. – 2024. – №3. – С. 181-190.

Публикации в других изданиях:

4. Трибунский, А. В. Влияние химических элементов (Mn, Mg) на механические свойства сплава 3005 / А. В. Трибунский, Е. А. Носова // Сборник докладов XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов. – Екатеринбург. – 2017. – С. 465-468.

5. Трибунский А. В. Влияние режимов гомогенизации на физико-механические свойства и микроструктуру алюминиевого сплава 6016 / В. Ю. Арышенский, А. В. Трибунский, В. А. Елагин, Е. В. Арышенский // Металлургия машиностроения. – 2019. – № 3. – С. 35-39.

6. Трибунский, А. В. Об особенностях зеренной структуры и интерметаллидных частиц второй фазы в сплаве 1565ч после горячей прокатки / М. С. Тептерев, Е. С. Читнаева, А. В. Трибунский, Е. В. Арышенский // Металлургия машиностроения. – 2019. – № 3. – С. 24-27.

7. Трибунский, А. В. Влияние толщины на штампуемость листовых алюминиевых сплавов / А. В. Трибунский, Е. А. Носова // Сборник докладов Международной молодёжной научной конференции "XV Королёвские чтения", посвящённая 100-летию со дня рождения Д. И. Козлова. – Самара. – 2019. – С. 138-139.

8. Трибунский, А. В. Исследование эволюции размеров и количества интерметаллидных частиц при производстве листов и лент из алюминиевого сплава 6016 / А. В. Трибунский, Е. В. Арышенский, Е. А. Носова, В. Ю. Чинов // Технология металлов. – 2020. – № 5. – С. 46-53.

9. Трибунский, А. В. Изучение особенностей эволюции текстуры и структуры при горячей прокатке в непрерывной группе клетей алюминиевого сплава 6016 / Е. В. Арышенский, В. Ю. Арышенский, Е. С. Каурова, А. В. Трибунский // Цветные металлы. – 2021. – № 7. – С. 84-91.

10. Tribunskii, A. V. Evolution of the Size and Number of Intermetallic Particles in the Production of Sheets and Strips Made of 6016 Grade Aluminum Alloy / A. V. Tribunskii, E. V. Aryshenskii, E. A. Nosova, V. Yu. Chinov // Steel in Translation. – 2023. – Vol. 53, No. 6. – P. 507-513.

11. Трибунский, А. В. Исследование напряженного состояния алюминиевых лент в очаге изгиба на 180 градусов / А. В. Трибунский, Е. А. Носова // Всероссийский научно-технический форум по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова : сборник докладов всероссийского научно-технического форума, Самара, 10–11 октября 2024 года. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2024. – С. 162-164.

Электронная база данных:

12. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624757 Российская Федерация. Типы рельефа поверхности изгиба листов и лент из алюминиевых сплавов при гибке с углом изгиба 180°: №2023623428: заявл. 06.10.2023: опубл. 19.12.2023 / А.В. Трибунский, Е.А. Носова.

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета
99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический
университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский
университет имени С.П. Королева»
(протокол № 4 от «22» апреля 2025 г.)

Заказ № _____ Тираж 100 экз. Форм. лист. 60×84/16. Отпечатано на ризографе.