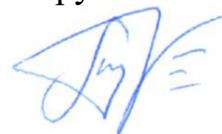


Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет имени
академика С.П. Королёва»

На правах рукописи

Трибунский Александр Викторович



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

Специальность 2.6.17. Материаловедение

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
Доктор технических наук, доцент
заведующий кафедрой ТМиАМ
Е. А. Носова

Самара – 2025

Оглавление

Введение	4
1 Обзор литературных сведений по влиянию толщины алюминиевых листов на их поведение при штамповке и гибке.....	14
1.1 Применение тонких алюминиевых листов в современных строительных конструкциях.....	14
1.2 Особенности производства тонколистового проката из алюминиевых сплавов.	16
1.3 Влияние структурно-фазового состава алюминиевых сплавов Al-Mn и Al-Mg на свойства тонких листов.....	17
1.4 Классификация листов из алюминиевых сплавов	26
1.5 Влияние толщины алюминиевых листов на механические свойства	27
1.6 Исследование влияния структурных изменений материала на его свойства.....	32
1.7 Влияние термической обработки на свойства и структуру алюминиевых сплавов	38
1.8 Влияние зёрненной структуры на процессы гибки и штамповки в тонколистовых алюминиевых сплавах	44
1.9 Влияние кристаллографической текстуры на штампуемость тонких листов из алюминиевых сплавов.....	46
2 Материалы и методы экспериментальных исследований	59
2.1 Материалы.....	59
2.2 Режимы пластической деформации.....	61
2.2.1 Горячая прокатка	63
2.2.2 Холодная прокатка	63
2.3 Выбор режимов термической обработки.....	64
2.4 Методика проведения испытаний по определению механических характеристик исследуемых сплавов	65
2.5 Методика определение твердости.....	66
2.6 Проведение технологических испытаний.....	66
2.6.1 Технологические испытания на Т изгиб.....	67
2.6.2 Технологические испытания на глубокую вытяжку цилиндрического стаканчика	68
2.6.3 Определение минимального радиуса изгиба	70
2.7 Моделирование процесса изгиба с углом 180° в программе DEFORM	71

2.8 Количественная оценка пригодности листов к гибочным операциям.....	71
2.9 Проведение микроструктурного анализа	75
2.10 Определение кристаллографической текстуры.....	76
2.11 Выводы по главе 2	78
3 Моделирование процесса изгиба T0 с углом 180 градусов.....	80
4 Влияние термической и деформационной обработки при получении тонких листов из сплавов 3005, 5182 и технического алюминия А5 на механические свойства и структуру	89
4.1 Изменение механических свойств проката в зависимости от степени пластической деформации	89
4.2 Изменение предела прочности, предела текучести и относительного удлинения в зависимости от условий термической обработки	94
4.3 Оценка влияния содержания марганца и магния на механические свойства алюминиевого сплава 3005	95
4.4 Влияние термической и деформационной обработки на изменение зёрновой структуры сплавов 3005, 5182, А5	99
4.5 Выводы по главе 4	105
5 Влияние структуры и условий деформационной и термической обработок на технологические свойства алюминиевых сплавов А5, 3005, 5182.....	107
5.1 Влияние термической обработки на технологические свойства сплавов А5, 3005, 5182	107
5.2 Влияние кристаллографической текстуры на способность листов из алюминиевого сплава 3005 к гибочным операциям	109
5.3 Изменение кристаллографической текстуры в тонких образцах из технического алюминия А5 и сплава 5182 в результате отжига	120
5.4 Вычисление минимального радиуса гибки.....	124
5.6 Выводы по главе 5	130
Заключение.....	133
Список использованных источников.....	137
Приложение А. Акт внедрения результатов АО «Самарский металлургический завод»	151
Приложение Б. Акт внедрения результатов АО «АлТи Фордж»	152
Приложение В. Акт внедрения результатов в учебный процесс Самарского университета	153

Введение

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.

Степень разработанности

Большой вклад в изучение и исследование процессов гибки листовых материалов внесли известные советские и российские учёные Семёнов Е.И. и Романовский В.П. В своих работах они подробно описали основные факторы, оказывающие влияние на способность листовых материалов к гибке, такие параметры процесса, как предельный радиусгиба, толщина листа, направление волокон металла (текстура), механические свойства. Применение полученных знаний позволило существенно увеличить возможности формоизменения алюминиевых листовых материалов. В исследованиях, проводимых научными коллективами СамГТУ, ВИАМ и ВИЛС, продемонстрировано, как можно улучшить характеристики алюминиевых листов, сделав их более гибкими и податливыми для штамповки, путём создания определённой структуры материала. Известны исследования Н.Г.Колбасникова (СПбГУ Петра Великого), которые показали, что структурная организация материалов имеет существенное влияние на их свойства. Благодаря этим исследованиям удалось рассмотреть формирование структуры листовых алюминиевых сплавов и выявить закономерности, определяющие способность алюминиевых листов к гибке и штамповке. Результаты исследований позволили глубже понять взаимосвязь между упорядоченностью структуры и механическими свойствами материалов, что может привести к новым технологическим решениям в области металлургии и машиностроения.

Исследование влияния кристаллографической текстуры на характеристики алюминиевых сплавов в процессах листовой штамповки является ключевой темой работ В.Ю. Арышенского, Ф. В. Гречникова, и Я.А.Ерисова. Это направление науки открывает перспективы для улучшения не только механических и физических свойств, но и эксплуатационной надёжности, а также технологичности производства алюминиевых изделий. Основной целью данных исследований является создание новых материалов, основанных на алюминиевых сплавах, которые бы обладали улучшенными характеристиками по сравнению с

существующими листовыми материалами. Таким образом, продолжение и развитие этой научной работы могут значительно повысить эффективность промышленных процессов, связанных с обработкой алюминиевых сплавов.

В условиях современных тенденций в различных отраслях промышленности, включая строительство и машиностроение, важно улучшить качество листов из алюминиевых сплавов с добавлением марганца и магния. Это требует более строгих стандартов для их технических и механических свойств. Для решения этой проблемы необходимо пересмотреть существующие методы производства, включая процессы отжига и деформационной обработки этих сплавов.

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.

Объект исследования

Выбор объектов исследования определяется техническими требованиями отечественных производителей продукции из гнутого алюминиевого профиля. Применение алюминиевого сплава 3005, который принадлежит к сплавам системы алюминий-марганец, для создания элементов в строительных и декоративных конструкциях связано с его уникальными характеристиками. Этот листовой деформируемый сплав отличается отличной пластичностью, что позволяет ему выдерживать значительные механические нагрузки без потери формы. Его коррозионная стойкость обеспечивает долговечность в агрессивных условиях, а хорошая свариваемость расширяет возможности использования в различных конструкциях. Кроме того, алюминиевый сплав 3005 обладает высоким уровнем усталостной прочности, что делает его идеальным выбором для элементов, подвергающихся постоянным динамическим нагрузкам. Именно благодаря этим преимуществам сплав 3005 стал объектом нашего исследования. Мы стремимся выявить новые области применения сплава в промышленности и определить оптимальные условия его обработки для максимизации его эксплуатационных качеств. Кроме того, глубокое изучение алюминиевого сплава 3005 позволяет нам не только улучшить понимание его свойств, но и способствует разработке более эффективных и надежных конструкционных решений в современной архитектуре и строительстве. Это открывает новые перспективы для использования алюминиевых сплавов в инновационных проектах. Процесс изготовления таких конструкций подразумевает проведение гибки полос и лент, в том числе применяется изгиб с углом 180° , то есть складывание заготовки до смыкания полок. В процессе листовой штамповки и гибки сплавов этой серии возникают различные дефекты, такие как боковые трещины или гофрообразование между полками гнутой заготовки. Потеря пластичности может быть связана с упрочнением в результате нагартовки, проявлением размерного эффекта или выделения упрочняющих фаз, а также особенностью кристаллографической текстуры. Производственная практика показывает, что на 3-5% продукции, при гибочных операциях алюминиевых листов из сплава 3005 толщиной менее 0,35 мм,

в месте изгиба происходит отслоение и растрескивание лакокрасочного покрытия. На листах толщиной 0,46 мм и более данного дефекта не наблюдается. В ходе научного исследования были тщательно подобраны различные образцы алюминия и его сплавов для анализа. Среди них особое внимание уделено техническому алюминию марки А5 и сплавам 3005 и 5182. Эти материалы прошли через несколько этапов обработки, включая литье, горячую и холодную прокатку, а также термическую обработку, что существенно повлияло на их структурные характеристики. Исследование направлено на выявление ключевых свойств и поведения выбранных материалов в различных условиях эксплуатации. Понимание структурных изменений, вызванных различными видами обработок, имеет важное значение для оптимизации производственных процессов и повышения качества готовой продукции. Конечная цель данного анализа – разработка рекомендаций по улучшению технологических параметров обработки алюминиевых сплавов, что способствует повышению их эксплуатационных характеристик и расширению областей применения. Это, в свою очередь, открывает новые перспективы для инновационных разработок в авиационной, автомобильной и строительной индустриях. Исследуемые сплавы находят широкое применение в строительстве, они служат основой для изготовления гнутых профилей и конструкций из них.

Предмет исследования

Исследование сосредоточено на воздействии различных параметров, таких как содержание магния и марганца, условия термической и деформационной обработки, на различные аспекты тонких алюминиевых листов из технического алюминия А5, сплавов 3005 и 5182. В данной работе рассматривается влияние различных факторов на характеристики материалов. Исследуется, как изменения в структуре и кристаллографической ориентации влияют на механические и технологические свойства этих материалов. Важно подчеркнуть, что качество и функциональность любого материала во многом зависят от его внутренней структуры и ориентации кристаллов. На начальном этапе исследования были

определены ключевые параметры, которые могут претерпевать изменения в процессе эксплуатации материалов или в результате технологических операций. Детальный анализ позволил выявить, как структурные перестройки влияют на физические свойства материалов, включая их прочность, эластичность и устойчивость к различным внешним воздействиям. Затем, было проведено изучение механизмов, которые лежат в основе изменений кристаллографической ориентации и как они коррелируют с функциональными характеристиками. Это позволило более точно определить методы улучшения технологической обработки материалов для повышения их эксплуатационных качеств. В заключение, результаты исследования могут быть использованы для оптимизации производственных процессов и улучшения характеристик продукции. Через правильное понимание взаимосвязи структурных и кристаллографических особенностей с механическими и технологическими свойствами, можно значительно улучшить качество и долговечность материалов. Это открывает новые возможности для инноваций в материаловедении и инженерии.

Соответствие паспорту научной специальности

Цели, задачи, содержание, методы исследования и научная новизна диссертации соответствуют паспорту научной специальности 2.6.17 «Материаловедение».

- п.3 Разработка научных основ выбора материалов с заданными свойствами применительно к конкретным условиям изготовления и эксплуатации изделий и конструкций;

- п.5 Установление закономерностей и критериев оценки разрушения металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий от действия механических нагрузок и внешней среды.

- п.6 Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств материалов на образцах и изделиях.

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».

Методология и методы исследования

Для изучения механических характеристик использовалась современная универсальная растяжная машина производства Zwick, способная выдерживать нагрузку до 35 кН. Важной частью исследования стало моделирование, которое проводилось с использованием программного обеспечения Deform. Это позволило эффективно смоделировать процесс гибки с угломгиба в 180 градусов. Этот подход подчеркивает важность компьютерного моделирования в современных исследованиях материаловедения, позволяя предвидеть поведение материалов под нагрузкой. Для испытаний на растяжение применялись плоские образцы размерами длиной 120мм и шириной 20мм, которые вырезались в поперечном направлении относительно проката. Технологические испытания на изгиб 180° проводились на образцах размерами 200x50 мм в направлении, поперечном прокату. Отжиг рулонов проводился в садочных печах и на ЛНТО. Исследование структуры производилось на микроскопе Axiovert – 40 MAT. Анализ полного элементного состава проводился с использованием оптико-эмиссионный спектрометр СПАС-05. Исследование текстуры выполняли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7. Твердость по Виккерсу определялась на приборе Wolpert 402MVD в соответствии с ГОСТ 9450-76. Завершающей частью проекта была детальная аналитика полученных данных, что способствовало более глубокому пониманию влияния различных факторов на механические свойства материалов.

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

В научных исследованиях крайне важно, чтобы результаты были надежными и могли быть проверены другими специалистами. Это достигается за счет нескольких ключевых практик. Прежде всего, результаты должны быть воспроизводимы, что означает, что при повторении эксперимента в аналогичных условиях результаты должны оставаться одинаковыми. Вторым важным аспектом является соответствие результатов с уже известными данными, опубликованными в научной литературе. Это подтверждает правильность методик и выводов исследования. Кроме того, применение комплекса стандартных современных методов исследования, включая использование специализированных приборов для анализа структуры, текстуры, фазового состава и механических свойств материалов, также играет важную роль в обеспечении достоверности результатов. Эти методы помогают глубже понять исследуемые объекты и подтверждают надежность получаемых данных. Таким образом, комплексный подход к выбору методик и аппаратуры, тщательное соблюдение процедур и верификация существующими данными, не только увеличивают научную ценность работы, но и способствуют дальнейшему развитию научной дисциплины, что подтверждает важность этих процессов. В итоге, эти практики обеспечивают прочную основу для научного прогресса и разработки новых технологий, что

демонстрирует их критическую роль в научных исследованиях.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – 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 73 рисунка, 12 таблиц и 6 формул.

1 Обзор литературных сведений по влиянию толщины алюминиевых листов на их поведение при штамповке и гибке

1.1 Применение тонких алюминиевых листов в современных строительных конструкциях

Облегчение строительных конструкций из алюминиевых сплавов, влечёт за собой необходимость снижения толщины листов, составляющих эти конструкции [1, 2]. Это позволяет создавать мембранные изделия, экономить на использовании листового материала и снижать затраты на транспортировку. Однако уменьшение толщины также приводит и к снижению механических свойств и характеристик штампуемости [3]. Это особенно актуально для слоистых композитов и многослойных материалов, из которых требуется изготавливать гнутые или цельнотянутые изделия. В таких случаях необходимо обеспечить необходимую штампуемость.

В процессе обработки алюминиевых сплавов методом листовой штамповки используются листы различной толщины. Так, параметры толщины могут варьироваться от минимальных 0,2 мм (примерно 0,008 дюйма) до максимальных 6,0 мм (около 0,24 дюйма). Особое внимание стоит уделить тому, что листы, чья толщина не превышает 1,0 миллиметра, обычно относят к категории тонких листов. Эти параметры толщины определяют не только технологию производства, но и возможные области применения алюминиевых листов. Тонкие листы, благодаря своей гибкости и легкости, часто находят применение в различных сферах промышленности, добавляя эффективность и экономичность в производственные процессы. Контроль за параметрами толщины листов важен для обеспечения качества готовой продукции и её соответствия техническим требованиям. Такие листы применяются в строительстве, где они могут быть использованы для отделочных работ, например, отделка вентилируемых фасадов, в пищевой промышленности, где они могут использоваться для изготовления кухонного оборудования и посуды, а также для изготовления крепежа и деталей.

Алюминиевые листы могут быть окрашены или покрыты специальными покрытиями для получения разных текстур и отделок. Это предоставляет дизайнерам и архитекторам широкий спектр возможностей для создания эстетически привлекательных изделий и конструкций.

Кроме применения тонких листов из алюминиевых сплавов в современной технике применяются листы и ленты из алюминиевых сплавов в составе слоистых композитов [4]. Композитные алюминиевые листы предлагают отличную прочность при минимальном весе, что делает их идеальным решением для внешней облицовки. По этой причине иногда их называют листами дибонд или сэндвич-панелями. Они легкие по весу, что делает установку и обслуживание более удобными. Их можно легко резать и формировать для различных применений, включая облицовку и украшения. Толщина отдельных слоёв в них находится в пределах 0,2-0,5 мм.

Значительный объём изделий из тонких алюминиевых сплавов и композитных заготовок производится методами гибки. Процесс гибки листового алюминия имеет различные особенности для каждой стороны заготовки, так как упругопластическая деформация этих сторон может существенно различаться [5]. Во время изгиба металл внутри угла сжимается в направлении, параллельном плоскости изгиба, и растягивается в направлении, перпендикулярном ей. Снаружи же наблюдается обратная картина: металл сжимается в направлении, перпендикулярном плоскости изгиба, и растягивается параллельно ей. Такая реакция характерна для крайних слоев заготовки. Нейтральный же слой, расположенный между сжатым и растянутым слоями, сохраняет свой первоначальный размер.

Процесс гибки сопровождается деформацией материала, что приводит к возникновению продольного и радиального напряжения. Это происходит из-за того, что наружные слои металла давят на внутренние. Максимальное давление наблюдается в области нейтрального слоя [6]. Поперечную деформацию можно уменьшить, увеличив ширину заготовки. В таком случае заготовка будет лучше сопротивляться деформации. Чтобы упростить процесс гибки тонких листов,

можно не учитывать изменения боковых поверхностей. В этом случае деформацию следует рассматривать как деформацию сдвига [7]. Гибка листового алюминия с малым радиусом закругления и высокой степенью пластической деформации отличается от гибки с большим радиусом закругления и малой степенью деформации. В первом случае напряжения и деформации распространяются на определённую длину, не концентрируясь под ребром пуансона. Минимальные радиусы гибки определяются в зависимости от пластических свойств материала, чтобы избежать появления трещин во время сгибания. Они соответствуют предельно допустимым изменениям крайних волокон.

1.2 Особенности производства тонколистового проката из алюминиевых сплавов

Для получения листов толщиной менее 1,0 миллиметра применяется двухэтапный процесс: на первом этапе производится горячая прокатка до толщин от 2,5 до 6,0 миллиметров, а на втором — холодная прокатка до толщин от 0,2 до 1,0 миллиметра. Толщина раската перед холодной прокаткой зависит от оборудования, используемого для горячей прокатки. На реверсивных станах практикой установлена [8] возможность получения конечной толщины до 6,0 миллиметров. На станах полунепрерывной и непрерывной групп возможно получение горячекатаной полосы из алюминиевых сплавов толщиной от 2,5 до 3,5 миллиметров. Обжатия при холодной прокатке зависят от свойств сплавов и могут достигать 90% и более без необходимости промежуточных отжигов [8]. Обжатия в клетях по переходам холодной прокатки распределяются неравномерно. Например, для проката выходной толщины от 0,5 до 0,6 миллиметров прокатка проводится от 6,0 миллиметров до выходной толщины за 10 проходов с различными обжатиями [9]. Такие показатели обжатия вызывают заметные изменения в строении и характеристиках алюминиевых листов по сравнению с заготовками толщиной 1,0...2,0 миллиметров и более.

В таблице 1.1 приведена схема обжатий на реверсивном стане при прокатке

рулонов выходной толщиной 0,45 миллиметров сплавов АВ, А1, Д1, Д16, АМг3 [8].

Из таблицы 1.1. видно, что степень деформации сплавов по переходам для получения листов из алюминиевых сплавов, наиболее распространённых в машиностроении, толщиной 0,45 мм составляет от 15,5 до 33% с нарастанием значений по мере увеличения обжатия, с получением общего обжатия около 92%

Таблица 1.1 – Схема обжатий на реверсивном стане при прокатке рулонов выходной толщиной 0,45 миллиметров сплавов АВ, А1, Д1, Д16, АМг3 [8]

Номер прохода	Толщина, мм		Обжатие	
	До прохода	После прохода	мм	%
1	5,8	4,9	0,9	15,5
2	4,9	4,12	0,78	16,5
3	4,12	3,44	0,68	16,4
4	3,44	2,86	0,58	16,8
5	2,86	2,37	0,49	17,2
6	2,37	1,95	0,42	17,7
7	1,95	1,4	0,55	28,2
8	1,4	1,0	0,4	28,6
9	1,0	0,67	0,33	33,0
10	0,67	0,45	0,22	33,0

1.3 Влияние структурно-фазового состава алюминиевых сплавов Al-Mn и Al-Mg на свойства тонких листов

Структура алюминиевых сплавов в литом состоянии, с которого начинается производство листового проката, может быть оценена по ряду параметров, среди которых можно отметить форму и размер зёрен, соотношение столбчатой и равноосной структур, размер дендритов, размер и распределение упрочняющих частиц, характер и степень их распределения. Однако структура слитков неоднородна и зависит от различных параметров [10, 11].

Составы российских алюминиевых сплавов определяются в соответствии с ГОСТ 4784 [12]. Алюминиевые сплавы, которые поддаются деформации, в основном состоят из твёрдых растворов. Эти растворы включают в себя различные легирующие

элементы, способность которых растворяться в алюминии может меняться в зависимости от температурных условий. Такая переменчивость растворимости играет ключевую роль в свойствах сплавов, поскольку влияет на их прочность и другие характеристики. Важно отметить, что выбор и соотношение легирующих элементов определяются исходя из требуемых свойств конечного продукта. Это особенно актуально для промышленности, где специфические характеристики материалов могут существенно повлиять на качество и долговечность изделий. В результате, понимание температурных зависимостей в растворимости этих элементов помогает инженерам создавать сплавы с заданными параметрами для широкого спектра применений. Такой тип твёрдых растворов создаёт предпосылки для упрочнения в результате термической обработки. Величина упрочнения зависит от степени легированности твёрдого раствора и критерия растворимости. В зависимости от этого деформируемые сплавы [13] можно разделить на 2 группы:

1. Термически не упрочняемые: технический алюминий, сплавы систем алюминий-марганец и алюминий-магний, изделия из которых поставляются в отожженном состоянии или после упрочнения путём холодной деформации;

2. Термически упрочняемые. При выборе их состояния поставки необходимо учитывать условия эксплуатации и возможное изменение их структуры и свойств при нагреве [14].

Воздействие легирующих компонентов и добавок в сплавах на основе алюминия и марганца имеет чёткие характеристики. Магний играет ключевую роль в улучшении характеристик алюминиево-марганцевых сплавов. Когда магний добавляется в алюминий-марганец, он значительно укрепляет сплав за счет упрочнения твёрдого раствора. Этот процесс не только повышает прочность материала, но и обеспечивает более высокую степень его надёжности в различных промышленных применениях. Процесс добавления магния способствует формированию микроструктуры, которая препятствует движению дислокаций в кристаллической решетке, что является ключевым механизмом увеличения прочности. Это открыло новые возможности для использования этих сплавов в авиационной промышленности, автомобилестроении и строительстве. Таким

образом, интеграция магния в состав алюминиево-марганцевых сплавов приводит к созданию более эффективных и долговечных материалов. Эти преимущества делают сплавы на основе алюминия с добавлением магния и марганца востребованными на рынке и способствуют разработке новых технологий и продуктов, обеспечивающих улучшенные эксплуатационные характеристики. Например, сплав 3004, содержащий около 1% магния, имеет прочность около 180 МПа в отожженном состоянии по сравнению с 110 МПа сплава 3003, в составе которого магния нет.

Значение предельного коэффициента вытяжки технического алюминия примерно такое же, как и в сплавах, содержащих более 4% магния [15]. Повышение предельного коэффициента вытяжки обусловлено содержанием магния в стали в диапазоне от 1% до 3%. Этот фактор имеет значительное влияние на процесс обработки материала. Благодаря оптимальному уровню магния, структура стали становится более прочной и устойчивой к воздействию внешних нагрузок. Кроме того, это позволяет улучшить качество конечного продукта и повысить его долговечность.

Из-за налипания заготовки на штамп снижается предельный коэффициент вытяжки чистого алюминия, что уменьшает возможную высоту штампованной продукции и коэффициент использования металла. Дополнительно, необходимо учитывать, что такие проблемы могут быть вызваны не только неправильным выбором материала для штампа, но и недостаточной смазкой поверхности. Более того, недостаточная твердость материала заготовки также может оказывать влияние на процесс вытяжки. Важно подчеркнуть, что для достижения оптимальных результатов необходимо контролировать не только качество материалов, но и правильную температуру обработки. Налипание заготовки на штамп – лишь одна из проблем, которая может сказываться на производстве, поэтому важно проводить постоянный мониторинг процессов и вовремя вносить коррективы для повышения эффективности производства.

Рассмотрим важность инноваций в области материалов на примере исследования, проведенного Оглодковым М.С. [16]. Он изучил вопрос повышения

технологичности путем добавления магния и кремния в определенных пропорциях. Данные экспериментов позволили понять, каким образом эти элементы влияют на свойства материалов и как можно оптимизировать их использование. Успех этого исследования открывает новые перспективы для развития современных технологий и создания более эффективных материалов. При содержании магния в диапазоне от 1% до 3% упрочняющие фазы могут выступать в роли естественного абразива, предотвращая налипание металла на штамп. Высокое содержание магния в материале может стать как плюсом, так и минусом. С одной стороны, увеличение количества упрочняющих фаз благоприятно для прочности изделия. С другой стороны, избыток магния может снизить пластичность листового материала и ухудшить его способность вытягиваться без разрывов. Таким образом, важно находить баланс между упрочнением и пластичностью для достижения оптимальных свойств материала.

В алюминиевых сплавах 3xxx серии содержание марганца значительно ниже его максимальной теоретической растворимости в алюминии [17]. Это объясняется уменьшением растворимости марганца при наличии железа в сплаве, а образование крупных частиц Al_6Mn может негативно влиять на штампуемость сплава. В отличие от других элементов, марганец способствует улучшению коррозионной стойкости сплавов.

Сплавы 3003 и 3004 отличаются высокой коррозионной стойкостью и средней прочностью в сочетании с высокой пластичностью [17]. Эти сплавы находят применение в областях, где требуются умеренная прочность и хорошая свариваемость. Они всё чаще используются вместо различных марок алюминия, обеспечивая более высокую прочность без потери коррозионной стойкости. Сплав 3004 широко применяется в производстве алюминиевых банок для напитков. В современной индустрии строительных материалов сплавы 3005 и 3105 занимают особое место благодаря их исключительным характеристикам. Обладая не только отличной прочностью, но и высокой формруемостью и устойчивостью к коррозии, эти сплавы являются востребованными компонентами для создания различных конструкций и отделочных элементов. Применение сплавов 3005 и 3105 в

производстве строительных материалов обеспечивает не только долговечность и надежность, но и эстетическая привлекательность в готовых изделиях. Кроме того, эти материалы обладают отличной обрабатываемостью, что позволяет создавать сложные формы и дизайнерские элементы без потери качества и прочности. Химические составы указанных сплавов в соответствии с EN 573-3 [18] представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Химический состав в % 3105, 3003, 3004, 3005 [18]

Сплав	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Прочие элементы	
									Каждый	Сумма
3105	0,60	0,70	0,30	0,3- 0,5	0,2- 0,8	0,20	0,40	0,10	0,05	0,15
3003	0,60	0,70	0,05- 0,20	1,0- 1,5	-	-	0,10	-	0,05	0,15
3004	0,30	0,70	0,25	1,0- 1,5	0,8- 1,3	-	0,25	-	0,05	0,15
3005	0,60	0,70	0,30	1,0- 1,5	0,20- 0,6	0,10	0,25	0,10	0,05	0,15

В алюминии и его сплавах обычно встречаются такие элементы, как железо и кремний. Необходимо тщательно контролировать их содержание, чтобы оно не превышало 0,5–0,6%. Это важно из-за негативного воздействия этих элементов на свойства сплава, такие как механические [19], технологические и коррозионные. Сплавы алюминия с марганцем имеют сложную микроструктуру, в которой железо, кремний и марганец могут находиться в твёрдом растворе или образовывать химические соединения, такие как $AlMg_2Mn$, $AlFeSiMn$ или $AlFeCuSi$. Однако они оказывают слабое влияние на фазовые превращения [11].

На рисунке 1.1 представлена диаграмма состояния системы алюминий-марганец при температуре 200 °С, которая служит важным инструментом для анализа структуры данных сплавов. Эта диаграмма позволяет исследовать взаимодействие элементов в сплаве и их изменения при различных условиях. Описывая состояние алюминиево-марганцевых сплавов на молекулярном уровне,

мы можем лучше понять их свойства и применение в промышленности.

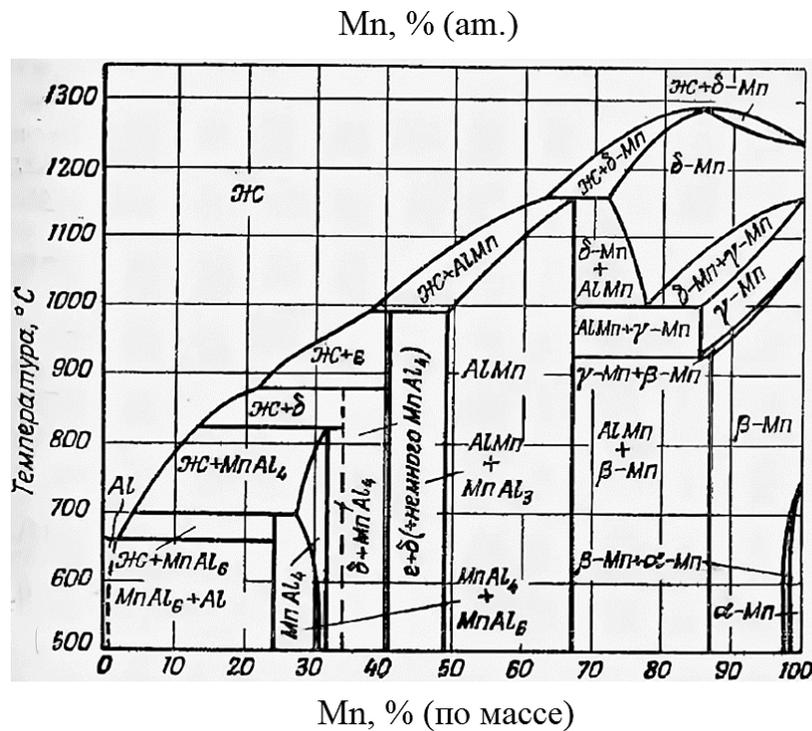


Рисунок 1.1 – Диаграмма состояния системы алюминий-марганец [11]

В производственных процессах применяются сплавы, в состав которых входит марганец в количестве от 1,0 до 1,6%. Термическая обработка ограничивается проведением отжига. Слитки, полученные методом полунепрерывного литья в кристаллизаторы с непосредственным выходом воды на поверхность слитка, охлаждаются с высокой скоростью. Это способствует удержанию большого количества марганца в пересыщенном твёрдом растворе. В связи с этим перед деформацией такие слитки подвергаются термической обработке, направленной на максимальное выделение марганца из раствора и коагуляцию выделений [21].

Снижение штампуемости листов из алюминиевых сплавов с уменьшением их толщины может быть связано с особенностями их структуры, такими как размер зерна и разнотернистость, кристаллографическая текстура, наличие упрочняющих фаз. В фазовый состав сплава 3005 входит фаза $MnAl_6$, которая может снижать пластичность и способствовать образованию трещин. Исходя из исследований,

можно отметить, что в присутствии железа марганец образует сложные интерметаллические соединения. Вместо обычного $MnAl_6$ формируется $Al_6(MnFe)$, представленный в виде крупных пластин, практически не растворимых в алюминии. Это в свою очередь приводит к увеличению концентрации напряжений при изгибе и ухудшению пластичности и технологичности материала [22]. Однако стоит отметить, что основным недостатком легирования марганцем является явление роста зерен при нагреве [23]. Дополнительно, повышенное содержание кремния в сплавах на основе алюминия может негативно сказываться на их деформируемости, поскольку это приводит к снижению пластичности материала. Для минимизации вредного воздействия железа и кремния рекомендуется поддерживать определенное соотношение $Fe:Si = 1,3:1,5$ в составе сплава [24]. Такие меры позволят улучшить общие технические характеристики материала и повысить его производственную эффективность. Пониженная пластичность сплавов может быть связана с наличием внутренних напряжений, как представлено в работе [25].

Высокие технологические свойства имеют алюминиевые сплавы системы алюминий-магний-кремний и изделия, выполненные из данных сплавов, которые в дальнейшем подвергаются холодной деформации штамповкой, гибкой и другим операциям, для изготовления таких изделий как детали наружные и внутренние элементы кузовов автомобилей, емкостей и баков различного назначения, строительных конструкций, в том числе для сварных конструкций, которые в процессе изготовления подвергаются окраске, нанесению полимерных и других покрытий [26].

В исследовании [27] на примере холоднокатаных листов было изучено влияние магния и цинка в количестве до 2% на структуру и механические свойства термически не упрочняемого термостойкого сплава $Al-2\%Cu-1,5\%Mn$, установлено, что в литом состоянии цинк полностью находится в составе алюминиевого твердого раствора, магний частично входит в эвтектические частицы фазы Al_2CuMg . Эти элементы практически не влияют на количество фазы $Al_{20}Cu_2Mn_3$, которая формируется в процессе деформационно-термической

обработки в виде наноразмерных дисперсоидов. Установлено, что добавление 1% магния повышает прочность холоднокатаных листов базового сплава на 15% после 3-ч отжига при 400 °С без снижения пластичности. Легирование цинком в свою очередь не оказывает существенного влияния на прочность.

Небольшие присадки марганца (или хрома), вводимого для дополнительного упрочнения сплава 0,3...0,5% *Mn* или 0,1...0,2% *Cr*, увеличивают предел прочности и не вызывают существенного изменения структурного состояния сплава. В производстве алюминиевых сплавов важную роль играет добавление таких элементов, как титан и ванадий. Исследования показывают, что даже их небольшие концентрации в составе сплавов могут значительно улучшить характеристики продукции. Эти металлы активно влияют на процесс измельчения зерна алюминиевых слитков, что, в свою очередь, ведет к повышению общей прочности и долговечности изделий. Таким образом, присутствие титана и ванадия в алюминиевых сплавах не только улучшает их физические свойства, но и способствует более эффективному использованию этих материалов в различных областях промышленности [22]. Это открытие подчеркивает значимость точной настройки химического состава сплавов для достижения оптимальных результатов.

На рисунке 1.2 изображена диаграмма состояния двойной системы алюминий-магний, которая использовалась для анализа структурного и фазового состава сплава 5182. Таблица 2.1 содержит информацию о химическом составе данного сплава. Процесс анализа позволяет более детально изучить взаимосвязь между составом сплава и его физическими свойствами. Важно учитывать, что химический состав оказывает существенное влияние на структуру и свойства материала.

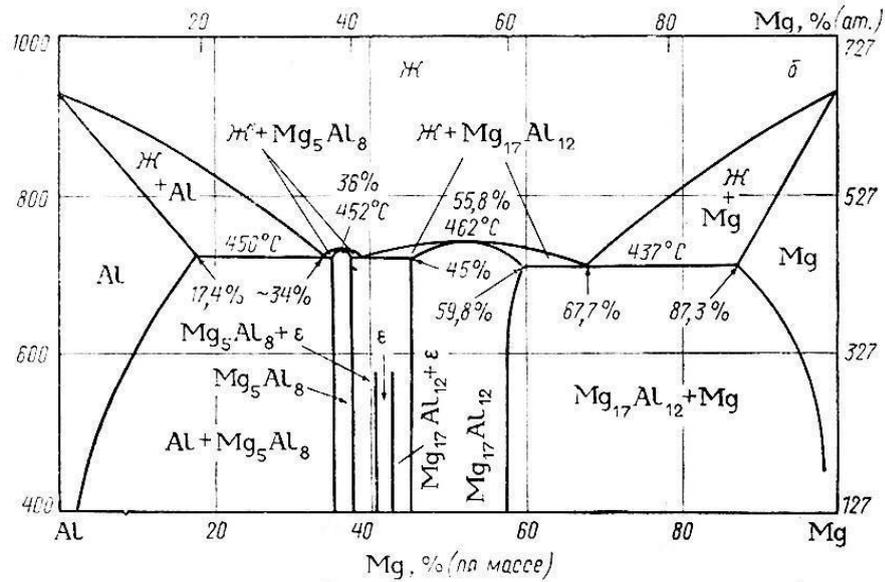


Рисунок 1.2 – Диаграмма состояния системы алюминий-магний [11]

В системе алюминий-магний присутствует несколько интерметаллидных соединений (Al_8Mg_5 , $Al_{30}Mg_{23}$, $Al_{12}Mg_{17}$), среди которых особое место занимает β -фаза, имеющая переменную растворимость и диапазон изменения концентраций 34,8...37,1 масс%. Это соединение образует эвтектическую систему с твёрдым раствором алюминия, эвтектическая точка которой достигается при содержании магния [33] в количестве 33%.

Сплавы алюминия и магния демонстрируют термодинамические и физические свойства, зависящие от температуры и процентного содержания магния. При температуре 450°C растворимость магния может составлять до 17,4%, в то время как при снижении температуры до комнатной его растворимость уменьшается до 1,4%. Это значительное изменение в растворимости приводит к различным металлургическим последствиям. Один из ключевых аспектов, связанных с высоким содержанием магния, превышающим 5,5%, заключается в формировании эвтектических включений β -фазы. Эти частицы возникают вследствие несбалансированных условий кристаллизации, что может оказать влияние на целостность сплава. В процессе гомогенизации, когда β -фаза растворяется в слитках, формируется однородная структура. Это состояние сплава стабилизируется при последующем охлаждении на воздухе. Следствием присутствия β -фазы в сплаве является уменьшение его пластичности и увеличение

хрупкости при комнатной температуре. Это снижает практическую применимость таких сплавов в условиях, требующих высокой устойчивости к механическим нагрузкам. Следовательно, тщательный контроль состава и процессов обработки сплавов критичен для обеспечения их надежности и функциональности в различных применениях.

1.4 Классификация листов из алюминиевых сплавов

В соответствии с ГОСТ 21631-2023 [28] листы из алюминиевых сплавов подразделяются:

а) по способу изготовления:

- 1) на неплакированные - без дополнительного обозначения;
- 2) с технологической плакировкой - Б;
- 3) с нормальной плакировкой - А;
- 4) с утолщенной плакировкой - У;

б) по состоянию материала:

- 1) на листы без термической обработки - без дополнительного обозначения;

Примечание - Листы, изготавливаемые без термической обработки, кроме листов из сплава марки ВД1, допускается подвергать отжигу.

- 2) отожженные - М;

- 3) четвертьнагартованные - Н1;

Примечание - Отожженные листы допускается изготавливать без термической обработки, если они удовлетворяют требованиям, предъявляемым к отожженным листам по механическим свойствам, качеству поверхности и неплоскостности. Такие листы маркируют буквой М в скобках - (М).

- 4) полунагартованные - Н2;

- 5) нагартованные - Н;

- 6) закаленные и естественно состаренные - Т;

- 7) закаленные и искусственно состаренные - Т1;

- 8) нагартованные, после закалки и естественного старения - ТН;

в) по качеству отделки поверхности:

- 1) на листы обычной отделки - без дополнительного обозначения;
- 2) повышенной отделки - П;
- 3) высокой отделки - В;

Примечания

1 Обозначение качества отделки поверхности П и В ставят после обозначения настоящего стандарта (или после года утверждения настоящего стандарта).

2 Листы с высокой отделкой поверхности изготавливают из алюминия марок А7, А6, А5, А0, АД00, АД0, АД1, АД и алюминиевых сплавов марок АМц, АМг2, а листы с повышенной и обычной отделкой поверхности изготавливают из всех марок алюминия и алюминиевых сплавов.

3 Листы высокой отделки поверхности изготавливают толщиной до 4,0 мм.

г) по точности изготовления:

1) на листы нормальной точности по толщине, ширине, длине - без дополнительного обозначения;

2) повышенной точности по толщине, ширине, длине, или одному или двум из указанных параметров - П.

1.5 Влияние толщины алюминиевых листов на механические свойства

Основываясь на сведениях, представленных в справочнике по авиационным материалам [29], были построены графики, демонстрирующие зависимость механических свойств технического алюминия марок АД0 и АД1, а также алюминиевых сплавов АМц и АМг2 от толщины и состояния поставки.

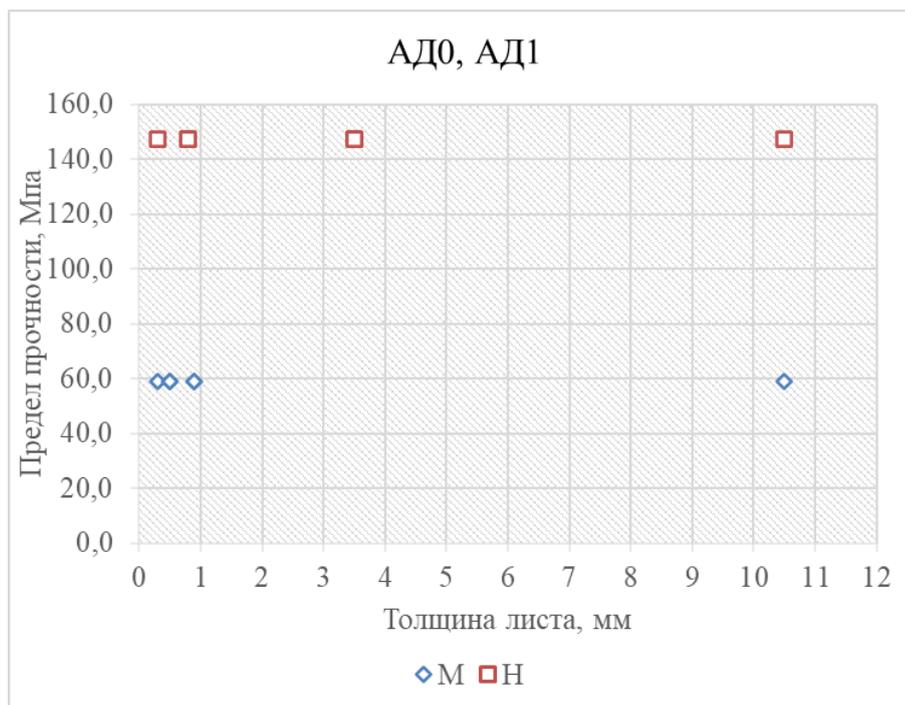


Рисунок 1.3 – Зависимость предела прочности листов алюминиевых сплавов АД0 и АД1 от толщины листов

Изучение рисунков 1.3 и 1.4 позволяет увидеть, что листы из технического алюминия, претерпевшие процесс нагартовки, обладают улучшенными прочностными характеристиками и сниженной пластичностью. Оказывается, что изменение толщины листов от 10,2 мм до 1,3 мм не оказывает влияния на прочность материала, однако при уменьшении толщины до менее 1,0 мм относительное удлинение уменьшается на 2...7 %. Этот факт указывает на важность контроля параметров процесса нагартовки для достижения оптимальных свойств материала. Важно также учитывать, что уменьшение толщины листов может снизить пластичность, что необходимо учитывать при проектировании конечных изделий из алюминия.

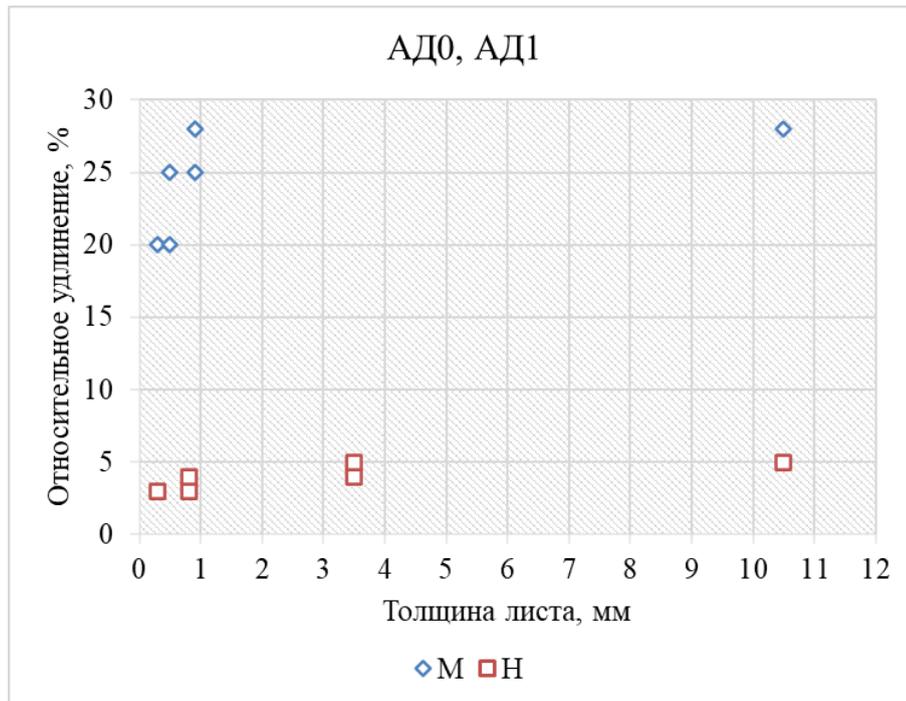


Рисунок 1.4 – Зависимости относительного удлинения листов технических алюминиевых сплавов АД0 и АД1 от толщины листов

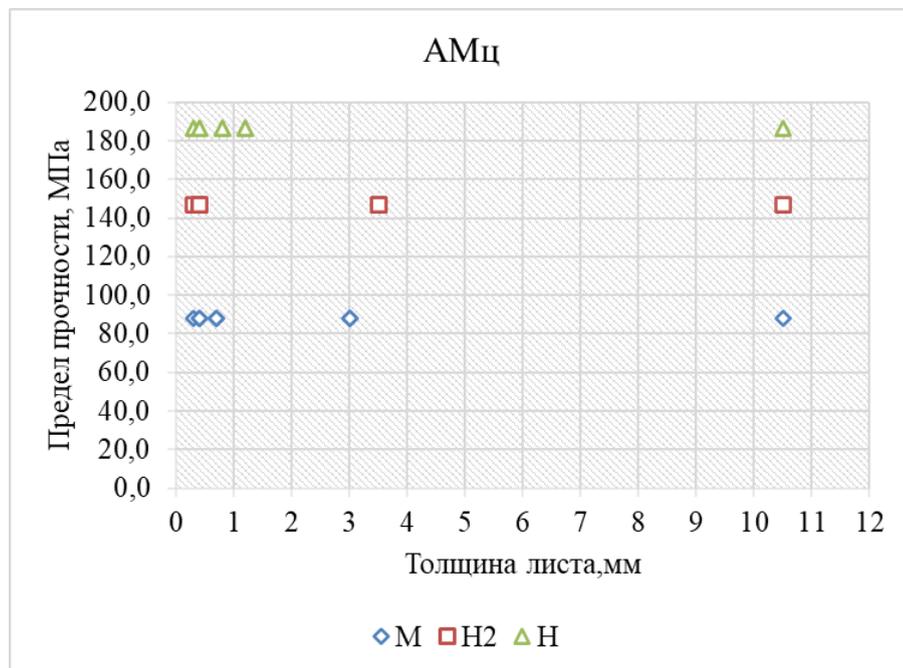


Рисунок 1.5 – Зависимости предела прочности листов алюминиевых сплавов АМц от толщины листов

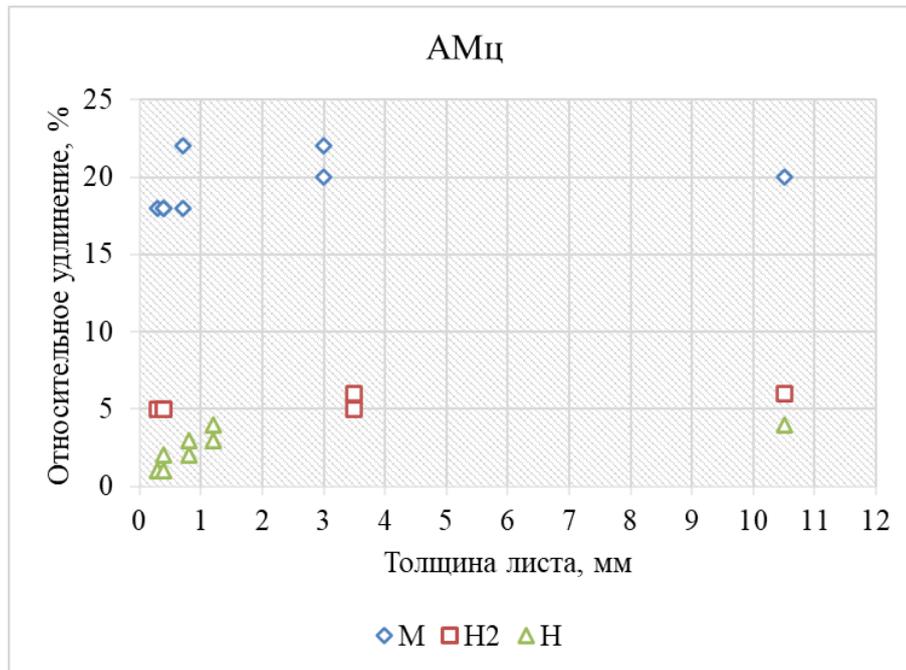


Рисунок 1.6 – Зависимости относительного удлинения листов алюминиевых сплавов АМц от толщины листов

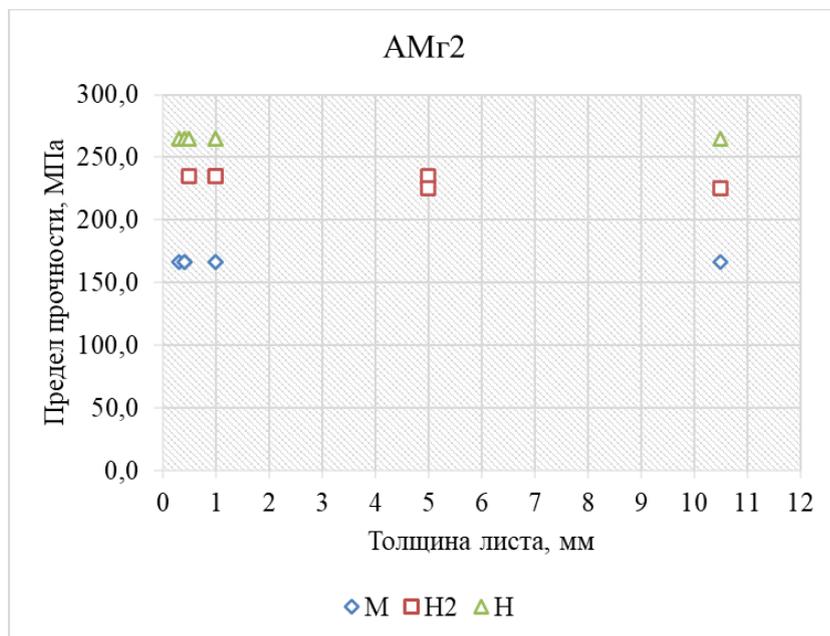


Рисунок 1.7 – Зависимости предела прочности листов алюминиевых сплавов АМг2 от толщины листов

Из рисунков 1.5 и 1.6 видно, что холодная прокатка приводит к повышению прочности и снижению пластичности листов из сплава АМц, уменьшение толщины листов от 10,5 до 0,3 мм не оказывает влияния на прочностные свойства, как в

нагартованном, так и в отожжённом состоянии, но при толщине менее 1 мм наблюдается снижение относительного удлинения в 4 раза для нагартованных листов и на 4% (от 22 до 18) – для отожжённых.

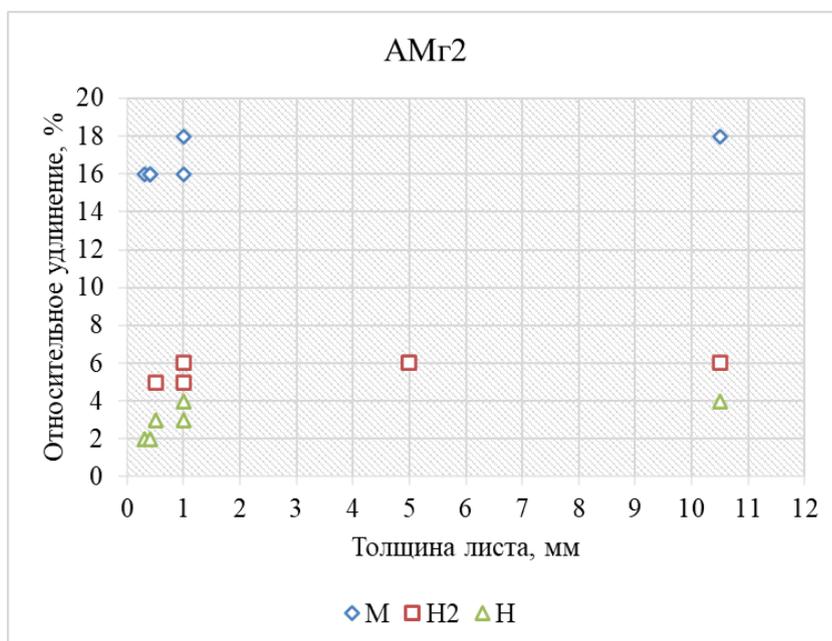


Рисунок 1.8 – Зависимости относительного удлинения листов алюминиевых сплавов АМг2 от толщины листов

Аналогичные наблюдения можно видеть и в поведении механических свойств листов из сплава АМг2 (рисунки 1.7 и 1.8), у которого нет корреляции между толщиной в интервале 0,3...10,5 мм и пределом прочности, но при уменьшении толщины менее 1 мм происходит уменьшение в 2 раза относительного удлинения нагартованных изделий и на 2% - у отожжённых.

Научное исследование было направлено на анализ механических свойств тонких листов, произведенных из чистого технического алюминия А5, а также листов, сплавленных с марганцем и магнием. Результаты значительно различались в зависимости от толщины материала. Особенно замечено, что при толщине менее 1,0 мм, введение от 1 до 2 процентов марганца или магния в алюминиевые сплавы приводит к снижению их пластичности. Это открытие подчеркивает важность выбора оптимального состава сплавов для различных промышленных применений, где требуется определенный уровень пластичности и прочности. Такие результаты

помогают производителям более точно подбирать сплавы для конкретных нужд, обеспечивая тем самым лучшие характеристики готовой продукции. Это исследование не только расширяет понимание о влиянии добавок на свойства алюминиевых сплавов, но и способствует разработке новых материалов с предсказуемыми характеристиками.

1.6 Исследование влияния структурных изменений материала на его свойства

В процессе деформации металла происходит модификация его кристаллической структуры, происходит изменение формы и размеров кристаллитов и их внутреннего строения, кристаллографическая переориентировка, что приводит к усилению прочностных характеристик, но одновременно к уменьшению пластичности и способности противостоять ударным воздействиям.

В результате деформации происходит трансформация формы и размеров зёрен металла, что влечёт за собой увеличение твёрдости [5] и снижение пластичности.

Воздействие на металлические структуры может привести к значительным изменениям их физических свойств. Когда металл подвергается деформациям, в его структуре возникают дислокации, что непосредственно влияет на такие характеристики, как электрическая и теплопроводность. Эти дефекты могут изменить поведение металла под нагрузкой и способствовать возникновению вторичной анизотропии, когда металл начинает больше напоминать монокристаллическую структуру. Такие изменения не ограничиваются только механическим воздействием. Анизотропия также может быть результатом термической обработки металлов, в ходе которой изменяется внутреннее устройство материала. Этот процесс может иметь как положительные, так и отрицательные последствия для промышленного применения металлов. Например, улучшение одних свойств может привести к ухудшению других, что требует

тщательного контроля процессов обработки. В итоге, понимание и контроль деформаций и термической обработки играют ключевую роль в разработке материалов с заданными характеристиками [21]. Это открывает новые возможности для создания металлических изделий с оптимальными свойствами для конкретных технических задач.

В процессе пластической деформации происходит нарастание числа точечных дефектов, таких как вакансии и межузельные атомы. При интенсивном процессе пластической деформации происходит увеличение количества дислокаций, включая дислокации с одинаковым направлением. Это ведет к образованию ячеистой структуры и накоплению точечных дефектов и дефектов упаковки [29]. Формирование порогов скользящих винтовых дислокаций порождает указанные дефекты, которые усиливаются при росте степени деформации и плотности растянутых дислокаций.

Основной метод изготовления тонких заготовок — это прокатка. В ходе прокатки тонких листов деформация может быть равномерно распределена по всей толщине [30]. В центральной части листа происходит деформация по типу чистого сдвига, которая остаётся постоянной независимо от условий трения. Однако небольшая неравномерность деформации по толщине листа всё же может возникать. На это влияет трение на контактной поверхности. Например, снижение коэффициента трения обеспечивает более однородное напряжённо-деформированное состояние металла в очаге деформации [31].

При прокатке тонких листов все зёрна по толщине примерно одинаково деформированы, поскольку уменьшается высота зоны затруднённой деформации, и с каждым следующим проходом прокатки деформация накапливается, а зёрна удлиняются и сплющиваются. Суммарное обжатие в чистовой группе клеток составляет 76–90%, а толщина сплюснутых зёрен находится в пределах 5–7 мкм. При этом нагрев происходит более однородно по сравнению с толстыми листами, поскольку при прокатке тонкого листа в продольном поле можно обеспечить равномерное нагревание и тем самым однородное измельчение зерна по всей структуре листа.

Как было подробно изучено в диссертации [45], в процессе пластической деформации металлов, особенно когда уровень деформации достигает значительных размеров, порядка 65% и выше, в материале происходят важные изменения. Образование ячеистой структуры дислокаций в металле становится ключевым моментом в этом процессе. Эта структура вызывает неоднородность в распределении деформаций, что является примером микронеоднородности, обусловленной дислокационной структурой. Такая неоднородность может привести к ряду нестабильностей в поведении металла при дальнейшей обработке. Одним из таких проявлений является нарушение равномерности процесса упрочнения металла, особенно заметное при холодной деформации. Этот эффект может быть вызван взаимодействием между различными уровнями и масштабами деформации, которые происходят одновременно в материале. В заключение, понимание и контроль за процессами, происходящими на микроуровне во время деформации металлов, могут значительно помочь в улучшении технологических процессов и качества конечных изделий. Детальное изучение ячеистой структуры дислокаций и связанных с ней неоднородностей является ключом к разработке более эффективных методов обработки металлов, что, в свою очередь, способствует повышению прочностных характеристик и надежности продукции.

Исследование уникальных физических и механических свойств кристаллических материалов играет важную роль в науке о материалах, особенно из-за того, что характеристики этих материалов изменяются в зависимости от направления кристаллической решетки. Такая особенность, известная как анизотропия, может проявляться как в механических свойствах, так и в кристаллографических аспектах, влияя на способы и методы обработки материалов. Следует отметить, что процессы обработки могут не только выявлять существующую анизотропию, но и модифицировать её, изменяя при этом систему остаточных напряжений в материале. Это приводит к необходимости тщательного анализа и прогнозирования изменений в структуре материала, чтобы обеспечить его надежность и эффективность в применении. Неоднородность дислокационной структуры и остаточные напряжения также представляют собой значимые

факторы, требующие внимания при изучении кристаллических веществ. Эти аспекты в значительной мере влияют на свойства материалов и могут быть критическими при выборе методов их дальнейшей обработки. С учетом всех этих аспектов, глубокое понимание характеристик материала и его поведения при различных видах обработки является неотъемлемой частью современной материаловедческой науки. Такой подход позволяет не только эффективно использовать материалы, но и способствует разработке новых технологий и улучшению существующих методов обработки.

В процессе холодной обработки сплав значительно меняет свою структуру и механические свойства. Основным фактором, определяющим эти изменения, является степень деформации. С ростом суммарной степени деформации алюминий становится более прочным, так как в его структуре не возникают процессы рекристаллизации и возврата.

Пластическая деформация металлов сопровождается значительными изменениями в их структуре, что ведет к их упрочнению. Ключевым фактором, влияющим на этот процесс, является однородность зёрен по размеру, форме и химическому составу [32]. Также не менее важны равномерность распределения примесей в материале и количество активных систем скольжения внутри каждого зерна. Эти факторы играют решающую роль в определении степени пластичности металла. Различные ориентации зёрен могут привести к неравномерному распределению напряжений во время деформации, что в свою очередь влияет на свойства материала. Количество потенциальных направлений скольжения в зёрнах также имеет важное значение, поскольку оно определяет, насколько эффективно металл может адаптироваться к внешним нагрузкам без разрушения. Таким образом, понимание и контроль над структурными характеристиками металла могут значительно улучшить его работоспособность и долговечность, обеспечивая более эффективное использование в различных промышленных приложениях [45]. Улучшенная пластичность и упрочнение материала через оптимальное распределение зерен и примесей открывает новые возможности для инноваций в материаловедении и металлургии. В ходе пластической деформации зёрна

материала деформируются, вытягиваются в направлении деформации, их ориентация становится упорядоченной, что формирует текстуру.

Пластическая деформация материала — сложный процесс, который приводит к изменению его структуры. В результате такой обработки различные части объекта изменяют свои размеры в разной степени, что вызывает анизотропию в механических и физических свойствах материала. Это разнообразие в изменении размеров приводит к тому, что внутри материала возникают напряжения, поскольку изменение одной части влияет на другие, которые могут оставаться неподвижными. Такие внутренние напряжения, возникающие во время обработки и сохраняющиеся даже после устранения внешних воздействий, известны как остаточные напряжения. Появление остаточных напряжений [33] может иметь значительные последствия для долговечности и надежности изделия. Они могут вызывать неожиданные трещины или деформации, что особенно критично в промышленных приложениях, где точность и прочность изделия имеют первостепенное значение. Как следствие, инженеры и исследователи уделяют большое внимание анализу и контролю остаточных напряжений в процессе проектирования и производства изделий [45]. Это позволяет улучшить характеристики изделий и продлить их эксплуатационный срок.

Состояние тонкой алюминиевой ленты в процессе прокатки можно описать с помощью трёхмерной модели, которая включает три сжимающих напряжения. Эта модель представлена на рисунке 1.9. В областях, где происходит деформация, могут наблюдаться отклонения от общепринятой модели трёхстороннего сжатия. Рассмотрим более внимательно нагруженное состояние в зоне боковых кромок полосы. Подобные аномалии могут влиять на общую динамику процесса и требуют дополнительного изучения. Важно учитывать, что эта особенность может иметь существенное значение при анализе результатов испытаний на прочность материалов.

Во время вытяжки ленты, частицы металла легко перемещаются в поперечном направлении, из-за чего вместо удлинения металла происходит его

расширение. Это ускоряет процесс вытяжки, так как трения здесь почти нет. Образование дополнительных напряжений в результате несогласованной вытяжки кромок является причиной разнообразного напряженного состояния на них. В данном случае наблюдаются два сжимающих и одно растягивающее напряжения [45]. Этот процесс влияет на боковую поверхность полосы, где напряженное состояние остается плоским из-за отсутствия одного из видов напряжений. Важно отметить, что такие деформации могут привести к нежелательным последствиям в структуре материала и его характеристиках.

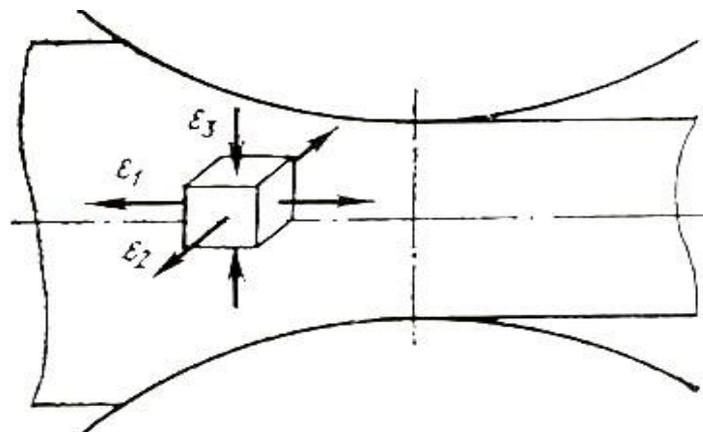


Рисунок 1.9 – Схема деформированного состояния при прокатке

В процессе прокатки полосы происходит её деформация в трёх направлениях: по ширине, по длине и по толщине. В результате этого полоса становится короче по ширине и длиннее по длине и толщине. Деформированное состояние полосы можно представить в виде объёмной схемы, где одна деформация направлена на укорочение [31], а две другие — на удлинение.

В процессе прокатки тонких листов, на фоне уширения полосы, происходит равномерное распределение деформации по всей её высоте. Данное явление обусловлено тем, что длина линии соприкосновения значительно превышает среднюю толщину полосы в области деформации. В этих условиях деформированное состояние полосы приобретает плоскую форму, а укорочение деформации становится незначительным. Неравномерность распределения деформации по высоте полосы часто обусловлена воздействием трения. Трение охватывает всю толщину полосы в процессе прокатки, обеспечивая равномерное

распределение деформации по всей её высоте.

Механические свойства металлов в определенной степени подвержены воздействию схемы деформации и соответствующего ей напряженного состояния, которое возникает после прокатки и приводит к небольшому изгибу боковых краев полосы [34, 35].

1.7 Влияние термической обработки на свойства и структуру алюминиевых сплавов

Исследование микроструктуры и химического состава материалов играет ключевую роль в определении их физических и механических свойств, что особенно важно для промышленных сплавов. Эти параметры не только формируют основу для инженерных решений, но и являются центром внимания для экспертов в области материаловедения. Важно понимать, что даже на более мелком уровне, который не виден невооруженным глазом, скрываются ключевые аспекты, определяющие такие критические свойства материалов, как прочность, пластичность и твердость. На уровне субструктуры, где детали становятся ещё более тонкими, инженеры и ученые могут углубить своё понимание механических характеристик, что позволяет разрабатывать более надежные и долговечные материалы. Эти изучения способствуют прорывам в технологиях и материалах, которые в конечном итоге формируют будущее промышленных приложений и продуктов. Таким образом, микроструктура и химический состав являются не просто техническими характеристиками, а фундаментальными элементами, которые определяют возможности и пределы использования материалов в самых разнообразных сферах применения.

Термическая обработка, наподобие "выпекания" материала в специальных условиях, позволяет изменять размер и форму кристаллов, их внутреннее строение, а также распределение различных фаз в сплаве. Пластическая деформация, с другой стороны, напоминает "лепку" материала, изменяя его форму под действием внешних сил. Комбинация этих двух методов позволяет "скульптурировать"

свойства сплава с удивительной точностью [36].

Для управления свойствами алюминиевых сплавов широко применяется термическая обработка, включающая такие этапы, как отжиг, закалка и старение. Отжиг – это процесс нагревания с последующим медленным охлаждением, цель которого – снизить внутренние напряжения в материале и обеспечить равновесную структуру. Выделяют два основных вида отжига: диффузионный (гомогенизация), направленный на выравнивание химического состава сплава, и рекристаллизационный, способствующий образованию новых, более равномерно расположенных кристаллов. Закалка – это резкое охлаждение, замораживающее высокотемпературную структуру, а старение – процесс происходящий при повышенных температурах, приводящий к изменению механических свойств сплава за счет медленного изменения его микроструктуры. Грамотное сочетание этих процессов позволяет получить материал с требуемыми характеристиками для конкретного применения. В итоге, именно тонкое управление структурой и составом позволяет создавать материалы с заданными свойствами, отвечающими высоким требованиям современной промышленности.

Процесс гомогенизации играет критическую роль в металлургии, особенно при обработке алюминиевых сплавов. Его основная цель – устранение микронеоднородностей химического состава, характерных для затвердевших слитков. Эта неоднородность, известная как дендритная ликвация, возникает из-за неравномерного распределения компонентов сплава во время кристаллизации [37]. В результате образуются участки с различной концентрацией легирующих элементов, что негативно сказывается на механических свойствах материала. Дендриты, имеющие древовидную форму, являются следствием неравновесной кристаллизации, когда различные элементы сплава распределяются неравномерно между центрами кристаллизации и междендритными пространствами. В итоге, механические характеристики отливки становятся непредсказуемыми, а ее дальнейшая обработка – затруднительной. Гомогенизация решает эту проблему за счет диффузии – процесса взаимного проникновения атомов различных элементов. Для ускорения диффузии необходимы два ключевых фактора: высокая

температура и достаточное время выдержки. Высокая температура, приближающаяся к температуре солидуса [38] (температуре начала плавления), обеспечивает значительное повышение подвижности атомов, а продолжительная выдержка дает им достаточно времени для перемещения и выравнивания концентраций. В случае алюминиевых сплавов, типичный температурный режим гомогенизации составляет 450-520°C, при этом время выдержки может варьироваться от 4 до 40 часов в зависимости от конкретного сплава и требуемой степени гомогенизации. Металлургическая промышленность часто сталкивается с вызовом устранения неоднородностей в структуре металлов, которые могут возникнуть в процессе их производства. Один из эффективных методов решения этой проблемы - гомогенизация. Этот процесс включает в себя выдержку металла при высоких температурах и последующее его остывание. Охлаждение может происходить по-разному, но чаще всего металл охлаждается вместе с печью или на открытом воздухе. Это делается для того, чтобы контролировать процесс остывания и минимизировать риск возникновения новых неоднородностей в структуре материала. Как результат, такая технология позволяет значительно улучшить однородность металла, повышая его качество и эксплуатационные характеристики. Подобные улучшения в структуре металлов имеют важное значение, поскольку они напрямую влияют на прочность, долговечность и другие важные свойства материалов. Таким образом, гомогенизация играет ключевую роль в обеспечении высоких стандартов качества в металлургии. Происходит выравнивание химического состава внутри кристаллитов (зерен) твердого раствора. В процессе гомогенизации, первоначально присутствующие крупные интерметаллидные фазы, которые представляют собой соединения легирующих элементов, частично или полностью растворяются в матрице. При последующем охлаждении эти интерметаллиды вновь выделяются, но уже в виде гораздо более мелких и равномерно распределенных вторичных включений. Это тонкое изменение микроструктуры имеет решающее значение для улучшения механических свойств сплава. В результате гомогенизации повышается пластичность – способность материала деформироваться без разрушения. Это

позволяет значительно увеличить степень деформации при последующей горячей обработке давлением, например, прокатке. Более пластичный материал лучше поддается деформации, позволяя получить продукцию с требуемыми размерами и формой с меньшим количеством технологических операций. Более того, гомогенизация позволяет существенно увеличить степень обжатия при прокатке без проведения дополнительных промежуточных отжигов, что существенно сокращает время и затраты на производство [39]. Таким образом, гомогенизация – это не просто технологическая операция, а важный этап, обеспечивающий получение высококачественных деформируемых алюминиевых сплавов с улучшенными механическими свойствами и технологическими характеристиками, оптимизируя производственный процесс и повышая эффективность производства. Правильный выбор температурно-временных параметров гомогенизации для конкретного сплава является ключевым для достижения желаемых свойств конечного продукта.

Важным этапом в обработке термически упрочняемых алюминиевых сплавов является процесс отжига, который целесообразно применять для полного снятия эффектов упрочнения, полученных в результате предшествующих этапов обработки, таких как закалка и старение. Температурный режим отжига колеблется в пределах 350-450°C [40], причем необходима выдержка в течение 1,5-2 часов, а затем медленное охлаждение с ограничением температурного градиента до 30°C в час. Это способствует проведению диффузионных процессов разложения твердого раствора и коагуляции продуктов разложения, что в конечном итоге приводит к значительным изменениям в структуре материала [41]. Одним из интересных аспектов является взаимосвязь между кристаллографическими ориентациями в деформированном и рекристаллизованном металле, которую экспериментально было установлено три способа. Это включает в себя возможность перехода текстуры деформации в идентичную текстуру рекристаллизации [45]. Таким образом, процесс отжига является не только технологически важным этапом, но также представляет интерес для исследований в области структурной трансформации металлических материалов.

Температура отжига для сплавов 3005, 5182, не подвергавшихся термическому упрочнению, должна быть между 310 и 335°C, это согласуется с диапазоном, указанным в источнике [37]. Термическая обработка алюминиевых сплавов требует точного научного подхода к определению режимов отжига. Подбор оптимальной продолжительности термического воздействия является критическим фактором для достижения желаемых свойств материала. При планировании режима отжига необходимо тщательно рассчитать длительность выдержки, принимая во внимание кинетику процессов растворения неравновесных фаз в структуре сплава. Ключевым моментом становится обеспечение полной диссоциации эвтектических включений различного химического состава, таких как Al_2Cu , Al_2CuMg и Al_8Mg_5 , присутствующих в исходной структуре материала. Недостаточное время выдержки не позволит полностью расплавить указанные интерметаллидные соединения, что негативно отразится на однородности микроструктуры и механических характеристиках готового изделия. Избыточная продолжительность термообработки, напротив, может привести к нежелательному росту зерна и ухудшению свойств сплава. Таким образом, научно обоснованный выбор времени термического воздействия должен базироваться на глубоком понимании фазовых превращений в конкретной алюминиевой композиции с учетом специфики поведения эвтектических включений при заданных температурах отжига. Рекристаллизованные зерна могут иметь разнонаправленную кристаллическую структуру, в отличие от исходного деформированного металла с текстурированной структурой. Этот вариант является наиболее распространенным.

В своей работе Оглодков М.С. приводит особенности проведения термической обработки на линии непрерывной термической обработки (ЛНТО) обшивочных плакированных листов из высокопрочного алюминиевого сплава В95пч. В отличие от садочной печи, равномерный быстрый нагрев ленты при термической обработке на ЛНТО обеспечивает однородную характерную структуру и необходимые для обшивочных листов качество поверхности и уровень механических свойств по ширине листа и в разных направлениях проката, в

соответствии с требованиями отраслевого стандарта авиационного назначения [42].

Процесс охлаждения сплава может вызвать выделение легирующих компонентов в форме включений кристаллов. Эти кристаллы, хоть и меньше по размеру после охлаждения, распределяются равномерно, что способствует сохранению пластичности сплава. В работе [45] отмечено, что при термической обработке алюминиевых сплавов существует высокий риск появления напряжений превышающих предел прочности [43] металла. Понимание механизмов возникновения тепловых напряжений имеет фундаментальное значение для предотвращения дефектов в инженерных конструкциях. Исследования показывают, что неравномерное распределение температуры в материалах может привести к серьезным структурным изменениям. При интенсивном термическом воздействии возникает сложная динамика напряжений между различными слоями материала. Когда поверхностные слои подвергаются быстрому нагреву, они стремительно расширяются, что, согласно исследованиям [44], приводит к вынужденной пластической деформации внутренних областей изделия. Это явление особенно заметно при резких температурных градиентах. Интересно отметить, что последующие этапы термического цикла характеризуются не менее сложными процессами. В период охлаждения наблюдается обратный эффект: внешние слои, как отмечено в работе [45], сокращаются и возвращаются к первоначальным размерам, создавая значительное компрессионное воздействие на центральные зоны материала. Центральные области материала противодействуют этому сжатию, что приводит к формированию растягивающих усилий в поверхностных слоях. Этот механизм сопротивления определяет окончательное распределение остаточных напряжений в изделии после полного охлаждения. Если в процессе нагрева тепловые напряжения превышают критический порог текучести материала, то после завершения термического цикла в изделии формируется характерная картина остаточных напряжений. В своей работе [46] авторы экспериментально подтвердили, что в этом случае внутренние слои оказываются под воздействием растягивающих напряжений, тогда как внешние слои,

подвергавшиеся растяжению во время нагрева, испытывают остаточное сжатие. Современные методы конечно-элементного моделирования позволяют прогнозировать эти эффекты и оптимизировать режимы термообработки для минимизации нежелательных остаточных напряжений в критически важных компонентах.

В своих работах [47-58] Гречников Ф. В., Арышенский В. Ю. и Уваров В. В. исследуют воздействие термообработки (отжига) и деформационной обработки на формирование текстуры. Большие обжатия при прокатке без промежуточных отжигов приводят к значительному расхождению в свойствах по направлениям в плоскости листов. Это объясняется тем, что зёрна при прокатке вытягиваются в направлении прокатки и сжимаются по высоте, металл становится волокнистым, что приводит к сильной анизотропии свойств в разных направлениях. Данную разницу в свойствах называют механической анизотропией. При рекристаллизационном отжиге механическая анизотропия чаще всего устраняется, а вот кристаллическая анизотропия в зависимости от температуры отжига может сохраняться, меняться или даже исчезать.

1.8 Влияние зёрненной структуры на процессы гибки и штамповки в тонколистовых алюминиевых сплавах

Структура тонких листовых алюминиевых сплавов оказывает значительное влияние на их штампуемость [59]. Способность к гибочным операциям у низколегированных сплавов обеспечивает неупорядоченная структура, за счёт низкого сопротивления деформации и высокой пластичности. Но для таких сплавов могут быть характерны локальные утонения [60].

Технологический процесс усложняется из-за увеличения числа проходов, что связано с появлением анизотропии при нагартовке металла, что приводит к увеличению пружинения металла и увеличению предельного радиуса гибки.

При легировании алюминиевых сплавов с целью повышения прочности листового проката приводит к снижению пластичности, а следовательно и к

резкому снижению предельных характеристик формоизменения [59].

В последние годы в материаловедении наблюдается тенденция к уменьшению размеров зёрен в материалах, что приводит к формированию наноструктур в металлических сплавах. Этот процесс оказывает значительное влияние на механические и технологические характеристики сплавов, что подтверждается исследованиями [61, 62].

Мелкозернистая структура в алюминиевых сплавах с размером зерна менее 100 мкм может снижать пружинение при гибке [30]. В современном материаловедении особое внимание уделяется методам контроля механических характеристик алюминиевых сплавов. Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о непрямой зависимости между размером зерна и деформационными свойствами алюминия. Парадоксальным образом на увеличение предела текучести при изгибных нагрузках влияют два противоположных фактора – как укрупнение зеренной структуры, так и ее измельчение. Этот феномен напрямую коррелирует с повышением величины упругой отдачи материала, что представляет определенные технологические вызовы в процессах металлообработки. Термическая модификация свойств является эффективным инструментом в решении проблемы пружинения алюминиевых изделий. Предварительный отжиг существенно трансформирует механические характеристики сплава, снижая его твердость и предел текучести. Такая обработка приводит к двойному технологическому преимуществу: одновременно уменьшается как сила, необходимая для изгиба заготовки, так и нежелательный пружинящий эффект после снятия деформирующей нагрузки. Инженеры-технологи должны учитывать эти закономерности при проектировании производственных процессов, связанных с формообразованием алюминиевых компонентов, чтобы обеспечить требуемую точность геометрических параметров готовых изделий. Кроме того, чем меньше радиус гибки, чем он ближе к толщине металла, тем меньше обратное пружинение.

Зёренная структура в алюминиевых тонких листах толщиной менее 0,5 мм с сильной степенью деформации отличается от структуры в более толстых листах

[75]. В тонких листах при сильной деформации (при прокатке со степенью деформации более 70%) получается стабильная фрагментированная структура металла с высокой плотностью дислокаций. Это приводит к повышению прочностных свойств изготавливаемых тонких полос и листов из алюминиевых сплавов [63], что может приводить к образованию трещин при изгибе 180° . В то же время в толстых листах неодинаковая деформация зёрен приводит к неоднородной зеренной структуре. Неоднородность может заключаться в разной величине зёрен, различном характере их границ, локальном присутствии полигональных границ и т. д.

1.9 Влияние кристаллографической текстуры на штампуемость тонких листов из алюминиевых сплавов

В металлургии алюминиевых сплавов с низким содержанием легирующих элементов большую роль играет изучение их структурных характеристик [64]. Особое внимание уделяется кристаллографической и металлографической текстурам. Кристаллографическая текстура определяет ориентацию кристаллических плоскостей и зёрен внутри металла относительно определённых направлений или плоскостей кристалла, что играет ключевую роль для процессов, таких как штамповка. Эта текстура имеет прямое влияние на свойства деформации, что подробно описано в научной работе [65]. Металлографическая текстура, в свою очередь, относится к распределению и ориентации зёрен в металле, не учитывая их кристаллографическую ориентацию [66]. Этот вид текстуры показывает, как зёрна расположены относительно направления деформации, что также важно для понимания механических свойств сплава. Таким образом, важность данных структурных характеристик не может быть недооценена, особенно в контексте производственных процессов, где требуется высокая точность и предсказуемость свойств материалов. Изучение кристаллографической и металлографической текстур помогает улучшить не только качество обработки металлов, но и их конечные эксплуатационные характеристики, что делает эти исследования крайне

важными для развития современных технологий в металлургии [67]. Исследование кристаллической структуры материалов включает в себя использование различных методик, среди которых выделяются как прямые, так и косвенные подходы [68]. Прямые методы, такие как рентгенографический и металлографический анализ, позволяют получить детальные сведения о внутреннем устройстве кристаллов. Рентгенографический анализ, в частности, использует дифракцию рентгеновских лучей для создания полюсных фигур, которые могут быть как прямыми, так и обратными, и дают представление о распределении кристаллических ориентаций в образце. Косвенные методы исследования базируются на анализе изменения механических или физических свойств в зависимости от анизотропии материала [30]. Эти методы помогают установить связь между макроскопическими свойствами материала и его кристаллической структурой без прямого изучения самой решетки. Таким образом, выбор метода исследования зависит от специфических целей анализа и характеристик исследуемого материала. Эффективное использование этих методов позволяет глубоко понять структуру материалов, что важно для многих областей науки и техники.

При горячей прокатке алюминиевых сплавов металл, помимо получения окончательной толщины, приобретает и конечную текстуру. Это оказывает важное влияние на продукцию, приводит например к появлению выступов при дальнейшей глубокой вытяжки [69]. При этом все направления кристалла могут быть описаны их кристаллографически эквивалентным направлением.

В области материаловедения важное значение имеют структурные характеристики, такие как предпочтительные ориентации в текстуре материала. Эти ориентации, часто выраженные через индексы Миллера, играют ключевую роль в определении свойств изделий. Например, обозначения вида $\{hkl\} \langle uvw \rangle$ используются для указания ориентации, где $\{hkl\}$ представляет направление, а $\langle uvw \rangle$ - соответствующую плоскость в структуре материала. Этот метод классификации особенно важен при анализе металлических сплавов, например алюминия. В специализированных таблицах, таких как таблица 1.3, представлены идеальные ориентировки для различных алюминиевых сплавов, что позволяет

ученым и инженерам оптимизировать процессы производства и улучшать качественные характеристики конечных изделий [31]. Такая систематизированная информация является незаменимым ресурсом для проведения научных исследований и разработки новых технологий в сфере металлургии. Существует тесная связь между структурными ориентациями и функциональными свойствами изделий, что делает детальное изучение и применение индексов Миллера крайне важным для достижения желаемых характеристик продукции. Таким образом, научное сообщество постоянно стремится к расширению понимания влияния текстурных ориентаций на поведение материалов под нагрузками, что способствует разработке более надежных и эффективных материалов для промышленности.

Таблица 1.3 – Идеальные ориентировки для алюминиевых сплавов, представленные индексами Миллера [31]

Индексы Миллера	{112}	{011}	{123}	{001}	{011}
Ориентации	<111>	<211>	<634>	<100>	<100>
	Медь	Латунь	S	C	G

Изучение текстуры материала требует точного анализа и часто использует методы, такие как рентгеновское излучение, оптические измерения и метод скользящей линии [33]. Эти техники помогают определить функцию распределения ориентации (ФРО), которая является ключевым показателем в науке о материалах. Пространство Эйлера H ($0^\circ \leq \varphi_1, \varphi_2 \leq 360^\circ; 0 \leq \phi \leq 180^\circ$), в котором эти измерения производятся, включает три ортогональные координатные оси $\varphi_1, \phi, \varphi_2$, и ФРО вычисляется с учетом контурных линий, размещенных на равноудаленных уровнях, перпендикулярно этим осям. Процесс вычисления ФРО в трехмерном количественном измерении представляет собой сложную задачу, в которой изображения предпочтительных ориентаций играют важную роль в интерпретации данных. Эти изображения часто демонстрируются в научных работах и на конференциях, как, например, на рисунке 1.10, где показан пример таких ориентаций. Как результат, точное понимание и анализ текстуры могут значительно улучшить понимание свойств материалов и способствовать разработке новых материалов с улучшенными характеристиками. Таким образом,

применение трехмерной функции распределения ориентации является неотъемлемой частью современных исследований в материаловедении.

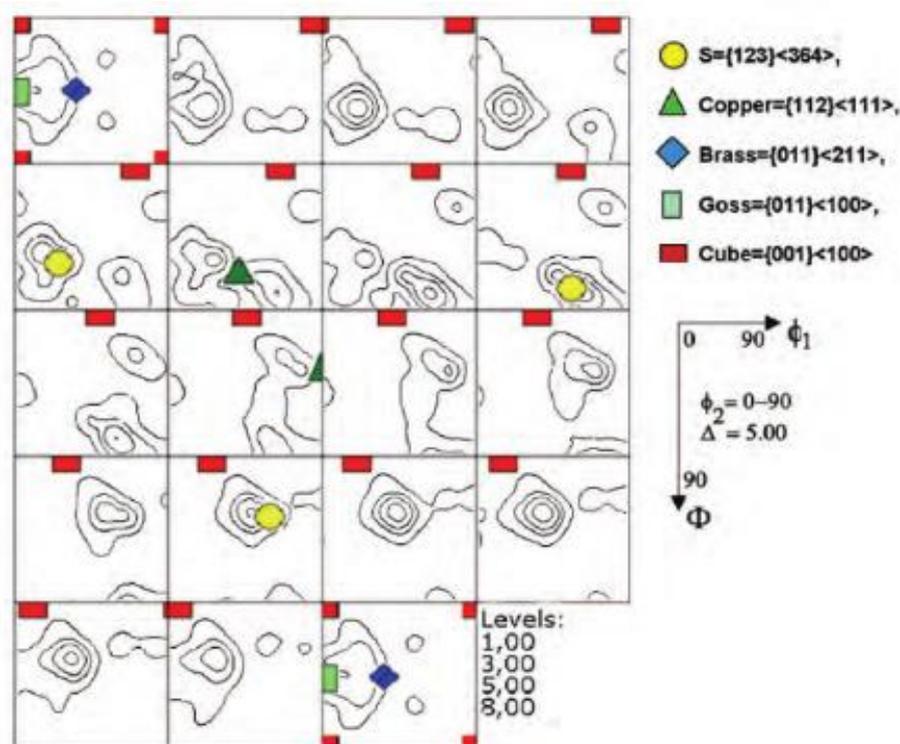


Рисунок 1.10 – Типичные для алюминиевых сплавов ориентации [33]

Исследование текстур в алюминиевых сплавах часто требует применения специализированных методов, среди которых особенно выделяется метод Эйлера. Основная его особенность заключается в анализе точек, находящихся на определенном расстоянии друг от друга в пространстве Эйлера, что позволяет более точно описывать структуру материала. На рисунке 1.11 изображены контуры, образованные кривыми волокон α и β [31], которые демонстрируют распределение этих текстур в пространстве. Этот графический метод не только помогает визуализировать распределение текстур, но и служит важным инструментом для улучшения понимания механических свойств сплава. Применение метода Эйлера значительно усиливает аналитические возможности при изучении материаловедении, особенно в контексте разработки новых сплавов с заданными характеристиками. Для достижения наибольшей эффективности этого метода, точность размещения точек в пространстве Эйлера играет ключевую роль,

так как от этого зависит точность и полнота получаемой информации о текстуре. Эта информация критически важна для инженеров и исследователей, стремящихся оптимизировать процессы обработки и использования алюминиевых сплавов. С помощью таких подробных данных можно значительно улучшить характеристики сплава, его прочность, пластичность и другие важные свойства. Эффективное применение метода Эйлера открывает новые возможности для инноваций в алюминиевой промышленности и способствует развитию современных технологий в материаловедении.

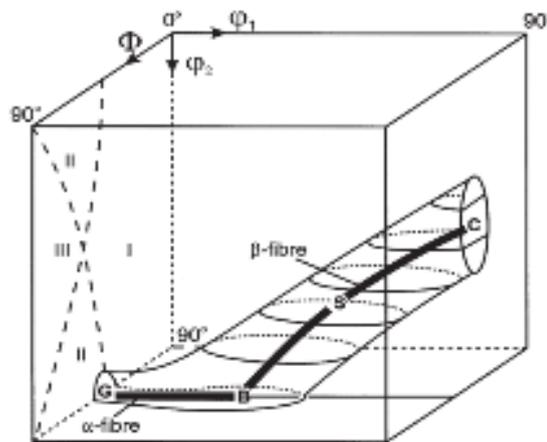


Рисунок 1.11 – Контур Эйлера [31]

Исследование металлов и их сплавов часто включает использование металлографического анализа для оценки их текстуры. Этот метод анализирует, как различные химические вещества взаимодействуют с поверхностями металла на разных уровнях скорости, что позволяет исследователям делать выводы о внутренней структуре материала. Одним из ключевых аспектов металлографического исследования является процесс окисления, в ходе которого металлы и сплавы реагируют с окислительной средой, формируя оксидные пленки разной толщины. Эти пленки изменяют способы, которыми материалы преломляют свет, что приводит к появлению разнообразных цветов — от желтого до серого [68]. Особенно интересным является изучение того, как определенные условия травления металлов могут привести к изменениям в цветовой гамме зерен, особенно в красные оттенки. Этот процесс не только демонстрирует визуальные

изменения, но и может служить показателем того, какие плоскости в материале параллельны плоскостям проката [67]. Это открывает путь для более глубокого понимания ориентации зерен внутри металла и его сплавов, что значительно важно для промышленных применений, где требования к физическим свойствам материалов очень высоки. В свете этих знаний ученые и инженеры могут разрабатывать более эффективные и прочные материалы, учитывая как химическую реактивность, так и внутреннюю структуру металлов. Этот подход не только улучшает качество продукции, но и способствует инновациям в области материаловедения. Научные работы, выпущенные как в России, так и в других странах, подтверждают значительное влияние текстуры на ключевые механические и технологические характеристики материалов. Опубликованные исследования показывают, что правильное формирование текстуры способствует улучшению как механических, так и технологических свойств. В частности, было выявлено, что оптимизация кристаллографической текстуры в производстве облицовочных листов значительно повышает их предел текучести. Эти результаты были достигнуты благодаря кропотливой настройке параметров горячей и холодной прокатки, а также благодаря использованию многократного отжига и специализированных смазочных материалов, что детально описывается в источниках [30]. Кроме того, исследования под номерами [70–74] демонстрируют, как тщательный подбор условий обработки материала позволяет достигнуть необходимой анизотропии и качества текстуры. Улучшение этих параметров приводит к повышению эффективности использования материала в различных промышленных приложениях. Таким образом, данные научные работы исследуют многообразие подходов и технологий обработки, которые влияют на свойства материалов, подчеркивая важность интеграции знаний о текстуре в производственные процессы для достижения лучших результатов в индустрии.

Научная деятельность в Самарском университете, в которой участвовали В.Ю. Арышенский, Ф. В. Гречников и Я. А. Ерисов, занималась исследованием алюминиевых сплавов с целью их оптимизации для последующей обработки. Эти учёные сосредоточили свои усилия на разработке специальной методики, которая

позволяет улучшить кристаллографическую текстуру алюминия, что, в свою очередь, влияет на качество и удобство штамповки листовых заготовок. Основная задача исследования заключалась в создании оптимальной композиции кристаллографической текстуры, что позволило бы значительно повысить штампуемость алюминиевых сплавов. В результате многолетних наблюдений и экспериментов, результаты которых были опубликованы в работах [78, 79], учёные смогли продемонстрировать значительное улучшение штампуемости. Это стало возможным благодаря тщательно подобранному составу кристаллографической текстуры. Таким образом, благодаря упорным исследованиям и новаторскому подходу, команда учёных из Самарского университета внесла значительный вклад в технологию обработки алюминиевых сплавов. Их работа открывает новые возможности для промышленности в области производства высококачественных алюминиевых изделий, что, без сомнения, будет способствовать развитию новых технологий и улучшению производственных процессов в будущем. В исследовании, представленном в таблице 1.4, анализируются изменения в структуре технического алюминия и сплава АМц, которые происходят после процесса переработки из первичных слитков в готовые листы. Результаты указывают на присутствие как положительных, так и отрицательных аспектов в анизотропии данных материалов, что влияет на их применение в производстве. В частности, обнаружено, что определённые особенности структуры способствуют предотвращению преждевременного истончения и разрушения листовых заготовок. Один из заметных эффектов обработки — это увеличение предельного формоизменения обшивочных листов, что значительно улучшает их гибкость при обтяжке. Это, в свою очередь, минимизирует возможность возникновения фестонов, что делает материал более адаптируемым для различных конструктивных приложений. Кроме того, оптимизация процесса производства позволяет достичь более равномерной толщины как самих листов, так и слоистых композитов, основанных на них. Такие улучшения в однородности материала предотвращают нарушение структурной целостности и повышают надёжность и долговечность конечных изделий. Эти данные подчеркивают важность контроля

качества и параметров процесса производства алюминиевых полуфабрикатов. Продолжение исследований в этом направлении может привести к дальнейшему улучшению характеристик материалов, что откроет новые возможности для их применения в различных областях промышленности.

В научном исследовании, представленном в таблице 1.4 и иллюстрированном на рисунке 1.12, был применён метод текстурной энтропии для анализа изменений в структуре алюминия в ходе его обработки. Изучение показало, что текстурная энтропия алюминия снижается на протяжении обработки. Однако для сплава АМц динамика изменения текстурной энтропии отличается: после начального снижения наблюдается её повышение во время холодной прокатки. Это можно объяснить воздействием упрочняющих фаз, которые влияют на структуру сплава, изменяя ориентацию кристаллографических плоскостей в процессе деформации. Такие изменения в структуре не только интересны с научной точки зрения, но и важны для практического применения материалов, поскольку влияют на их свойства и качество обработки. В результате, различия в поведении текстурной энтропии между чистым алюминием и сплавом АМц подчёркивают сложность взаимодействия компонентов сплава и необходимость дальнейших исследований для оптимизации технологических процессов.

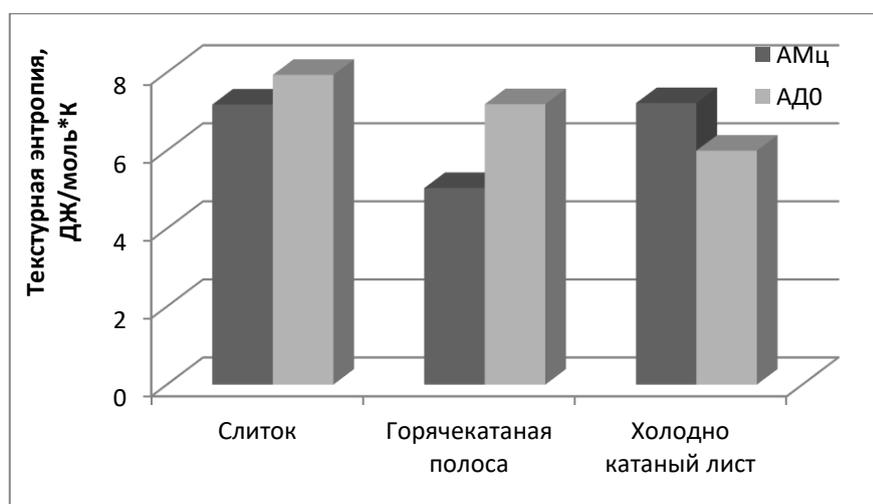


Рисунок 1.12 – Динамика изменения энтропии структуры алюминиевых сплавов АД0 и АМц в процессе обработки [68]

Таблица 1.4 – Характеристики структуры и анизотропии алюминиевых заготовок [68]

Наименование сплава	Место отбора	Основные ориентировки	Весовые доли	Показатели анизотропии			Влияние на свойства
				μ_{21}	μ_1	μ_{12}	
АД0	Отливка	(120)<112>	0,54	0,53	0,43	0,41	
		(123)<139>	0,23	0,52	0,58	0,71	
		(110)<111>	0,15	0,5	0,62	0,38	«+»
	После горячей прокатки	(100)<010>	0,11	0,5	0,14	0,5	
		(139)<321>	0,105	0,28	0,5	0,28	
		(320)<001>	0,09	0,52	0,44	0,78	«+»
	После холодной прокатки	(311)<233>	0,06	0,28	0,52	0,28	
		(100)<010>	0,13	0,5	0,14	0,5	
		(311)<233>	0,12	0,28	0,52	0,28	
			(123)<153>	0,08	0,71	0,48	0,54
АМц	Отливка	(531)<123>	0,167	0,16	0,2	0,28	«-»
		(100)<010>	0,082	0,45	0,15	0,35	
		(311)<233>	0,073	0,31	0,52	0,27	
		(110)<001>	0,06	0,56	0,43	0,85	«+»
	После горячей прокатки	(100)<100>	0,10	0,5	0,14	0,5	«-»
		(113)<233>	0,097	0,33	0,54	0,27	
		(233)<110>	0,05	0,73	0,56	0,58	«+»
	После холодной прокатки	(100)<100>	0,14	0,5	0,14	0,5	
		(100)<110>	0,094	0,14	0,51	0,14	«-»
		(139)<123>	0,093	0,28	0,47	0,28	
		(110)<533>	0,05	0,4	0,65	0,45	«+»

Исследование, проведенное в работе [80], сфокусировалось на анализе влияния начального размера зерна на процессы рекристаллизации и формирования текстуры в алюминиевом сплаве 5182. Для достижения желаемой структуры, пробы, изготовленные из горячекатаной полосы, подвергались отжигу при различных температурах - 455 °С и 540 °С - в течение трех часов. После процедуры отжига при 455 °С, размер зерен составил около 8,5 мкм, а после отжига при 540 °С размеры увеличились до нескольких сотен микрон. В рамках последующих этапов эксперимента, пробы были подвергнуты холодной прокатке с общей степенью обжатия в 71,2% и последующему отжигу при различных температурах: 205 °С, 218 °С, 233 °С, 245 °С, 260 °С и 370 °С в течение трех часов. Эти процессы способствовали изменению структуры материала и формированию определенной

текстуры, оказывая влияние на его свойства и характеристики. Полученные результаты позволяют лучше понять механизмы, лежащие в основе рекристаллизации алюминиевого сплава 5182 и его последующего формирования.

Изучение воздействия размера зерна на скорость рекристаллизации сплавов привело к открытию: сплав с мелким исходным зерном рекристаллизуется быстрее, чем сплав с крупным. В мелкозернистых образцах обнаружено, что границы зёрен способствуют образованию зародышей, что, в свою очередь, влияет на формирование полос сдвига и переходных полос. Сравнивая это с крупнозернистыми сплавами, где зародыши распределяются хаотично, становится ясно, что процессы рекристаллизации протекают по-разному. Учитывая, что в крупнозернистых сплавах наблюдается как медленное снижение механических характеристик при растяжении с ростом температуры отжига, так и ощутимая неоднородность зёрен после рекристаллизации, можно заключить, что размер зерна существенно влияет на процессы структурных изменений в металлических сплавах.

Алюминиевые сплавы, обработанные в результате отжига, характеризуются особыми структурными особенностями, включая β -файбер, Госса и куб, которые образуют текстуру металла. Стоит отметить, что крупнозернистые сплавы проявляют более выраженную текстуру прокатки в области β -файбер. В контексте изучения ориентационных особенностей материалов часто встречаются прямые и обратные полюсные фигуры, однако ключевые компоненты (плоскость и направление) в конкретных системах сплавов остаются неизменными, с изменениями, касающимися в основном полюсных плотностей. В некоторых исследованиях [85, 86] были представлены микроструктуры алюминиевых сплавов, полученные при использовании поляризованного света.

При изучении структуры материалов обнаружено, что зёрна, обладающие различной кристаллографической ориентацией, имеют разнообразные цвета. Это является результатом анализа определенных компонентов текстуры и полюсных фигур, где указывается полюсная плотность для кристаллографических плоскостей и их изменения в процессе обработки. Более яркие оттенки зёрен и большая

площадь, окрашенная в один цвет, свидетельствуют о более высокой полюсной плотности соответствующих кристаллографических плоскостей. Этот феномен открывает новые возможности для понимания внутренней структуры материалов и их свойств, а также для разработки более эффективных методов обработки и управления качеством. Это позволяет предположить существование определённой энтропии текстуры, которую, как и для энтропии смешивания [87], можно рассчитать с помощью формулы $\Delta S = -R \sum_{z=1}^{\infty} n_z \ln n_z$, где n — количество зёрен с определённой окраской, z — количество вариантов окраски зёрен. Исследования, указанные в литературе [88–91], демонстрируют, что увеличение разнообразия текстур в листовых материалах способствует повышению их энтропии. Это разнообразие текстур напрямую влияет на улучшение пластичности и обрабатываемости данных материалов, что крайне важно для производства тонких листов. Однако следует отметить, что чрезмерные пластические характеристики могут иногда приводить к местным утонениям стенок изделий, как обсуждается в исследованиях [92, 93]. Также стоит учитывать, что при работе с полюсными фигурами, содержащими обширный объем графической информации, возникают трудности в установлении численных корреляций между графикой и механическими, а также технологическими свойствами материалов. Эти комплексные связи требуют дополнительного анализа для разработки эффективных методов обработки, что открывает новые направления для дальнейших исследований в данной области.

В результате анализа литературных данных было установлено:

1. Механические и технологические свойства тонких листов из алюминиевых сплавов определяются толщиной металла. Алюминиевые листы толщиной менее 1,0 мм сплавов алюминий-марганец и алюминий-магний относительно листов толщиной более 1,0 мм имеют минимальные пластические свойства, относительное удлинение может быть близким или даже равняться нулю, при этом прочностные характеристики не значительно зависят от толщины листов. Производственная практика подтверждает литературные данные, она показывает, что на 3-5% продукции, при гибочных операциях алюминиевых листов сплавов

алюминий-марганец, алюминий-магний толщиной менее 0,35 мм, в месте изгиба образуется грубый рельеф, из-за которого происходит отслоение и растрескивание лакокрасочного покрытия. На более толстых листах, толщиной 0,46 мм и более, данного дефекта не наблюдается.

2. Процесс изготовления строительных конструкций подразумевает проведение гибки алюминиевых полос и лент, в том числе применяется изгиб с углом 180° . В процессе листовой штамповки и гибки алюминиевых сплавов возникают различные дефекты, такие как боковые трещины между полками гнутой заготовки. Потеря пластичности может быть связана с упрочнением в результате нагартовки, проявлением размерного эффекта или выделения дисперсных фаз, а также особенностью кристаллографической текстуры, таким образом, термическая и деформационная обработки, Гибочные операции с тонкими листами алюминиевых сплавов значительно зависят от таких факторов, как размер зерен и кристаллографическая текстура материала. Эти характеристики металла играют ключевую роль в определении его прочности и гибкости. Кроме того, на процесс гибки влияет и однородность распределения зерен по всей поверхности сплава, что существенно повышает качество конечных изделий. Тщательный контроль этих параметров позволяет достичь наилучших результатов в гибочных операциях, обеспечивая долговечность и функциональность изделий на выходе. Эта информация подчеркивает значимость выбора правильного сплава для конкретного применения, основываясь не только на стоимости и доступности материала, но и на его специфических свойствах и характеристиках. Однако в доступных источниках не обнаружено количественных зависимостей между этими характеристиками.

В свете вышеизложенного, целью данного исследования является 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 искомого результата необходимо решить следующие задачи:

1. Определить влияние толщины металла на способность тонких листовых материалов к операциям гибки;
2. Установить влияние условий отжига на образование трещин при гибочных операциях;
3. Экспериментально установить зависимость механических и технологических свойств листового алюминиевого сплава 3005 от содержания марганца и магния в составе;
4. Установить закономерности преобразования кристаллографической текстуры в тонких образцах из алюминиевых сплавов в результате деформационной и термической обработки;
5. Установить влияние кристаллографической текстуры на способность листов из алюминиевых сплавов к гибочным операциям.

2 Материалы и методы экспериментальных исследований

2.1 Материалы

При проведении исследований применялись тонкие листы из алюминиевых сплавов марок А5, 3005 и 5182, поставляемые по химическому составу в соответствии с EN 573-3 [18] и механическим свойствам по EN 485-2 [94]. Выбор объектов исследования связан с широким использованием материалов в строительстве и отделке [95]. В таблице 2.1 представлены данные по химическому составу технического алюминия А5 и алюминиевых сплавов 3005 и 5182, которые имеют различные применения в промышленности. Среди них, сплав 3005 выделяется своими отличными характеристиками, такими как хорошая свариваемость, высокая усталостная прочность и отличная коррозионная стойкость. Эти свойства делают его предпочтительным материалом для использования в различных инженерных и строительных проектах, где требуется долговечность и надежность. Обширное применение и положительные эксплуатационные характеристики сплава 3005 подчеркивают его значимость в современной промышленности.

Таблица 2.1 – Химический состав в % сплавов А5, 3005, 5182 [18]

Сплав	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Прочие элементы	
									Каждый	Сумма
А5	0,10	0,40	0,05	0,01	-	0,01	0,05	-	0,03	0,10
3005	0,6	0,7	0,30	1,0- 1,5	0,20- 0,6	0,10	0,25	0,10	0,05	0,15
5182	0,20	0,35	0,15	0,20- 0,50	4,0- 5,0	0,10	0,25	0,10	0,05	0,15

Для определения количественной взаимосвязи содержания химических элементов марганца и магния, а также для разработки модели, описывающей влияние типов и режимов термической обработки и пластической деформации на формирование рациональной структуры, механических и технологических свойств

необходимо знать:

1. Характеристики формирования структуры, которая оказывает прямое влияние на их механические свойства. Микроструктура, образуемая в результате этих процессов, определяет прочность, устойчивость к износу и другие характеристики материала. Важно понимать, что каждый вид деформации и термической обработки приводит к уникальным изменениям в структуре материала, и их комплексное воздействие может существенно улучшить или ухудшить его свойства. Для этого были проведены испытания на одноосное растяжение, а также измерения твёрдости нагартованных и отожжённых тонких листов из сплавов А5, 3005 и 5182.

2. Влияние сформированной после отжига структуры тонкого листового металла на технологические свойства. Для этого проведены испытания на Т-изгиб без оправки с угломгиба 180° до образования трещины, определены углы пружинения и минимальные радиусы гибки.

3. Влияние пластической деформации, типа и режимов отжига на формирование зёрновой структуры и характер распределения дисперсных включений.

4. Влияние пластической деформации и отжига тонких алюминиевых листов на текстуру металла.

Важным этапом в исследовании стало рассмотрение процесса пластической деформационной обработки и его влияния на конечные результаты. Параллельно с этим, особое внимание уделено анализу данных, полученных в ходе термической обработки, и выявлению закономерностей в изменениях. Не менее важным шагом стало изучение различных методов обработки экспериментальных данных и их влияние на достоверность результатов исследования.

Для практического определения влияния легирующих элементов (магния и марганца) на механические и технологические свойства алюминиевых сплавов выполнен анализ химического состава листовой продукции производства АО «Самарский металлургический завод» из сплава 3005 с 2015 по 2024 год. Анализ

показал необходимость снижения содержания Mn на $0,03 \div 0,08\%$ и повышения содержания Mg на $0,04 \div 0,08\%$ относительно средних значений. Химический состав опытных слитков представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Химический состав опытных слитков из сплава 3005

Название	Содержание компонентов, %								Примеси, % (не более)	
	Si	Fe	Cu	Mn↓	Mg↑	Cr	Zn	Ti	Каждая	Сумма
<i>Требования по EN 573-3 [18]</i>	0,6	0,7	0,3	1,0– 1,5	0,2– 0,6	0,1	0,25	0,10	0,05	0,15
<i>Средние значения (2015–2023)</i>	0,23	0,40	0,12	1,15	0,37	0,01	0,04	0,02	0,0123	0,04
Рулон № 1, 2 (t=0,25 мм)	0,22	0,42	0,12	1,14	0,41	0,01	0,03	0,02	0,0128	0,04
Рулон № 3, 4 (t=0,25 мм)	0,24	0,42	0,11	1,1	0,46	0,01	0,04	0,018	0,0122	0,04
Рулон № 5, 6 (t=0,33 мм)	0,21	0,41	0,12	1,15	0,4	0,01	0,03	0,02	0,0119	0,03
Рулон № 7, 8 (t=0,33 мм)	0,22	0,41	0,12	1,1	0,45	0,01	0,03	0,02	0,0119	0,03

2.2 Режимы пластической деформации

Изображение 2.1 [98] демонстрирует стандартную схему процесса создания тонких листов из сплавов алюминия. Этот процесс включает в себя несколько ключевых этапов, таких как гомогенизация, горячая и холодная деформация, а также промежуточное отжигание. Каждый из этих этапов требует специализированного оборудования для обеспечения качественного производства. Помимо этого, для получения высококачественных тонких листов из алюминия также важно обеспечить правильную последовательность проведения каждого этапа процесса. Например, гомогенизация сплава играет ключевую роль в обеспечении однородной структуры материала перед дальнейшей деформацией. Эффективное использование оборудования для гомогенизации, горячей и холодной деформации, а также промежуточного отжига является неотъемлемой частью процесса производства тонких листов из алюминиевых сплавов. Важно учитывать все технологические нюансы и особенности каждого этапа для достижения желаемого результата в

конечном продукте.

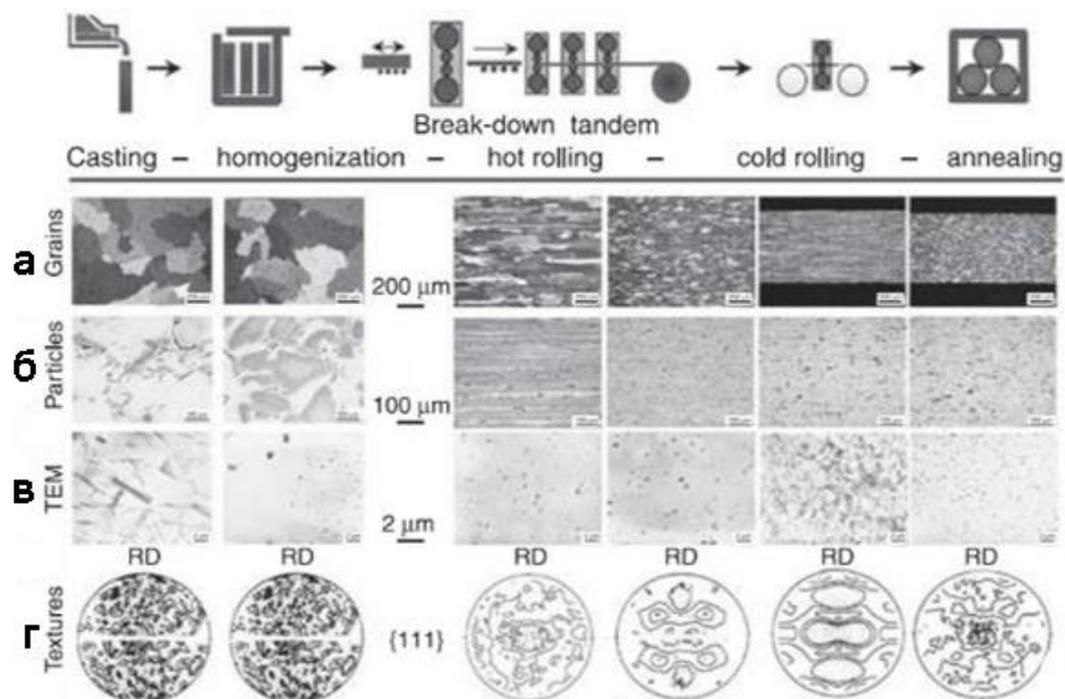


Рисунок 2.1 – Структуры алюминия при деформации [98]:

а – зерна; б – фазы и частицы; в - дисперсоиды; г - текстура

На рисунке 2.1 можно увидеть, как меняется микроструктура сплава алюминий-магний-марганец в процессе обработки. Изначально структура сплава была литой, а после обработки стала отожжённой с выраженной кристаллографической текстурой. Развитие микроструктуры тонких листов из алюминиевых сплавов является процессом, который подвержен воздействию различных факторов, включая температуру, степень деформации и скорость формования. Этот процесс приводит к тому, что литая микроструктура становится более тонкой, что можно наблюдать на рисунке 2.1а. Кроме того, на рисунках 2.1б и 2.1в можно увидеть выравнивающиеся крупные эвтектические фазы, которые формируются в процессе деформации, а также мелкодисперсные частицы, присутствующие в структуре. Особое внимание уделено расположению частиц интерметаллидов на рисунке 2.1г, где также представлены характерные параметры текстуры [98].

2.2.1 Горячая прокатка

При производстве тонких листов из алюминиевых сплавов, важной операцией является горячая прокатка. На первоначальном этапе материал обрабатывается в реверсивной клети, после чего происходит прокатка в пятиклетевой непрерывной группе стана горячей прокатки. Температура металла перед прокаткой должна находиться в диапазоне от 410 до 460°C. Далее, после завершения горячей прокатки, рулоны остаются остывать на воздухе в течение двух-трёх суток, перед тем как направить их на холодную прокатку. Горячая прокатка играет ключевую роль в формировании структуры металла и обеспечивает необходимую форму и размер листов. Этот процесс способствует улучшению механических свойств материала и готовит его к последующей обработке. Важно строго контролировать температуру металла перед прокаткой, так как это влияет на его пластичность и способность к деформации. Процесс горячей прокатки требует точной настройки оборудования и навыков опытных специалистов. Он представляет собой сложную технологическую операцию, влияющую на качество и характеристики конечного продукта. Правильно выполненная горячая прокатка обеспечивает высокую производительность и качество листового материала из алюминия.

2.2.2 Холодная прокатка

При текущей технологии получения рулонов из сплава 3005 толщиной 0,2, 0,25, 0,3, 0,33, 0,46, 0,72, 0,82 и 0,92 мм, для толщин 0,2 и 0,25 мм существует вероятность образования повреждений (трещин) в месте изгиба при проведении испытаний на изгиб T0 по ГОСТ 14019—80. Для установления зависимости механических и технологических свойств от степени деформации проводили холодную прокатку на 5-ти клетевом непрерывном стане из горячекатаной заготовки толщиной от 3,0 до 6,0 мм. Суммарную степень деформации определяли исходя из режимов проката рулонов, она представлена в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Суммарная степень деформации образцов из технического алюминия А5 и сплавов 3005, 5182

Сплав	Толщина горячекатаной заготовки / конечная толщина, мм					
	3,5 / 0,25	3,5 / 0,3	3,5 / 0,33	4,0 / 0,46	5,5 / 0,82	6,0 / 0,92
	$\varepsilon_1, \%$	$\varepsilon_2, \%$	$\varepsilon_3, \%$	$\varepsilon_4, \%$	$\varepsilon_5, \%$	$\varepsilon_6, \%$
А5	92,9	-	-	88,5	85,1	-
3005		91,4	90,6			84,7
5182		-	-			-

2.3 Выбор режимов термической обработки

Для формирования специфической структуры на образцах рулонов при термической обработке использовались различные режимы, отобранные из анализа литературных источников и учитывающие широкий диапазон температур. Руководствуясь данными диаграмм состояния, представленными на рисунках 1.1 и 1.2, были определены оптимальные режимы термической обработки, которые подробно описаны в таблицах 2.4-2.6. Отжиг рулонов осуществлялся как в стационарных печах, так и на производственной линии непрерывной термообработки. Комбинируя различные методы термической обработки, удалось добиться нужной структуры материала и желаемых свойств исследуемых образцов.

Таблица 2.4 – Режимы термической обработки для сплава 3005

Тип отжига	Толщина ленты, мм	Суммарная степень деформации при холодной прокатке, %	Температура		Скорость движения ленты, м/мин	Время выдержки, ч
			По металлу, °С	По воздуху, °С		
В садочной печи	0,25	92,9	270	310	-	1,5
	0,3	91,4				
	0,33	90,6				
	0,46	88,5				
	0,82	85,1				
	0,92	84,7				
На ЛНТО	0,25	92,9	270	400	150	-
	0,3	91,4			145	
	0,33	90,6			120	
	0,46	88,5			85	
	0,82	85,1			70	
	0,92	84,7			60	

Таблица 2.5 – Режимы термической обработки для сплава 5182

Тип отжига	Толщина ленты, мм	Суммарная степень деформации при холодной прокатке, %	Температура		Скорость движения ленты, м/мин	Время выдержки, ч
			По металлу, °С	По воздуху, °С		
В воздушно-циркуляционной печи	0,25	92,9	340	370	-	1
	0,46	88,5				
	0,82	85,1				
На ЛНТО	0,25	92,9	340	430	150	-
	0,46	88,5			85	
	0,82	85,1			70	

Таблица 2.6 – Режимы термической обработки для А5

Тип отжига	Толщина ленты, мм	Суммарная степень деформации при холодной прокатке, %	Температура		Скорость движения ленты, м/мин	Время выдержки, ч
			По металлу, °С	По воздуху, °С		
В воздушно-циркуляционной печи	0,25	92,9	255	300	-	1
	0,46	88,5				
	0,82	85,1				
На ЛНТО	0,25	92,9	255	380	150	-
	0,46	88,5			85	
	0,82	85,1			70	

2.4 Методика проведения испытаний по определению механических характеристик исследуемых сплавов

Механические испытания выполняли в соответствии с ISO 6892-1 [99] на универсальной машине ZWICK. Для испытаний применялись плоские образцы размерами 120 x 20 мм, отбор образцов производился в направлении, поперечном прокату.

2.5 Методика определение твердости

Микротвёрдость — это показатель прочности отдельных фаз и структурных компонентов материала, а также твёрдость внутри отдельных зёрен, тонкого поверхностного слоя после химико-термической обработки и тонких листов и фольги.

Для измерения микротвёрдости используется метод вдавливания алмазной пирамидки.

Метод определения твёрдости по Виккерсу основан на измерении глубины проникновения алмазного конуса (индентора) в материал при определённой нагрузке. После снятия нагрузки на поверхности образца остаётся отпечаток, соответствующий глубине погружения индентора.

Поскольку геометрические размеры индентора строго регламентированы, вместо глубины погружения измеряется площадь отпечатка на поверхности исследуемого материала [100].

Метод определения твёрдости по Виккерсу подходит для материалов с высокими показателями твёрдости, так как в качестве индентора используется алмазный конус, который имеет максимальную известную твёрдость.

Испытания проводились на приборе Wolpert 402MVD в соответствии с ГОСТ 9450-76 [101].

2.6 Проведение технологических испытаний

Для установления пригодности исследуемых сплавов А5, 3005 и 5182 к формовочным операциям и штампуемости в данной работе проводились технологические испытания на изгиб и испытания на вытяжку стаканчика.

2.6.1 Технологические испытания на Т изгиб

Для технологических испытаний на изгиб от рулонов отбирались пластинки размером 50 x 200 мм в направлении, поперечном прокату. Перед испытанием производилась оценка внешнего вида пластинок: на испытуемых пластинках должны отсутствовать механические повреждения в виде сколов, царапин, трещин.

Пластинка сгибается на 180° , далее зажимается в тиски, так чтобы две стороны изгиба плотно прилегали друг к другу. Образец достают из тисков и производят визуальный осмотр места изгиба.

Если в месте изгиба отсутствует дефект «апельсиновая корка» (рисунок 2.2а), трещины и расслоения металла, образец считается выдержавшим испытания Т0.

Если наблюдается растрескивание и «апельсиновая корка» (рисунок 2.2б) - испытания продолжают до тех пор, пока поверхность металла в месте изгиба не останется без изменений по сравнению с образцом, не подвергшимся испытаниям.

Осмотр и оценка образцов производится визуально без использования увеличительных приборов.

Схема проведения испытаний приведена на рисунке 2.3 [102].

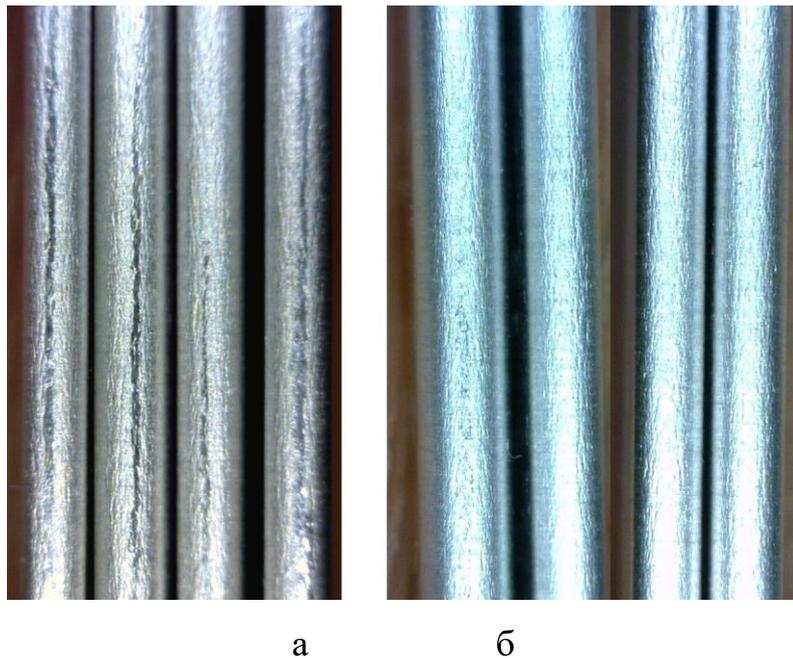


Рисунок 2.2 – Внешний вид поверхности изгиба листа: а – с дефектом типа «апельсиновая корка» и трещинами, б – без дефектов

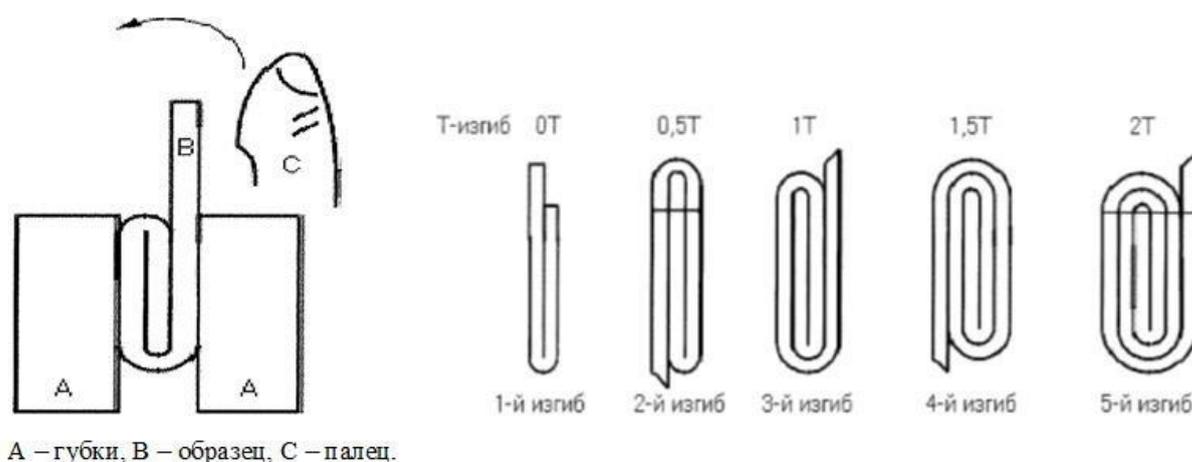


Рисунок 2.3 – Схема испытаний на изгиб [102]

2.6.2 Технологические испытания на глубокую вытяжку цилиндрического стаканчика

Процесс вытяжки металла является важным методом превращения плоского листа в пустотелую деталь любой формы. Этот процесс требует специальных инструментов, таких как штампы, включающие в себя пуансон, матрицу и прижим (см. рис. 2.4). Испытание на прочность с использованием плоского пуансона представляет собой стандартный способ проверки материала на возможность выдержать глубокую вытяжку. В рамках такого испытания круглые заготовки из листового металла с разными диаметрами D подвергаются глубокой вытяжке в матрице с использованием цилиндрического пуансона диаметром d_p . Этот метод позволяет оценить прочностные характеристики материала и его способность к формированию сложных деталей при высоких нагрузках. Изучение способности материала к глубокой вытяжке основано на анализе максимального диаметра D_{max} круглой заготовки, который не вызывает образования трещин и разрывов. В процессе вытяжки чаще всего происходит разрыв дна вдоль периметра [103]. Предельный коэффициент вытяжки, необходимый для оценки этой способности, вычисляется по формуле (2.1).

$$K_{пр} = \frac{D_{max}}{d_n}, \quad (2.1)$$

где d_n – диаметр пуансона.

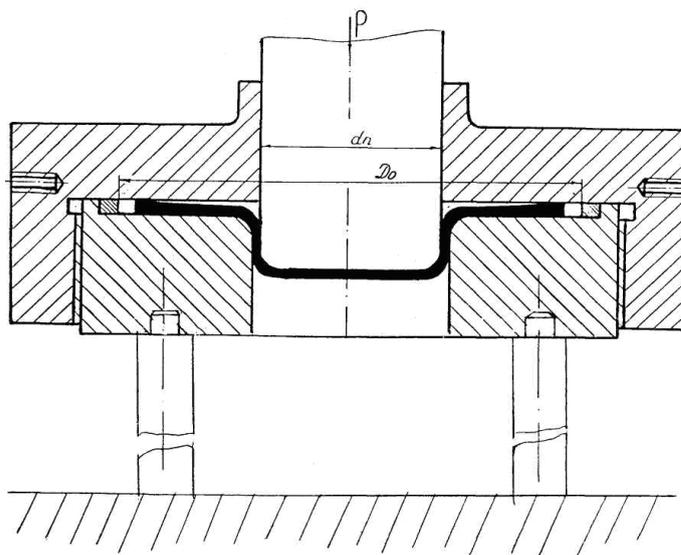


Рисунок 2.4 – Схема вытяжки стаканчика

В контексте проведённого научного исследования использовались специально подготовленные образцы, каждый из которых имел размеры 50x50 мм и был вырезан из листа определённой толщины. Эти образцы были организованы в три различные группы, внутри которых образцы преобразовывались в круглые заготовки с диаметрами 38, 42 и 50 мм. Для каждой группы были выбраны различные методы термической обработки: отжиг и закалка. Целью эксперимента было изучить влияние разных видов термообработки на свойства материалов. Применение разнообразных методов позволяло оценить изменения в структуре и свойствах материалов после их обработки. Таким образом, эксперимент помог установить оптимальные условия для каждого типа обработки, что имеет важное значение для практического применения в различных отраслях промышленности. Результаты исследования предоставили ценные данные, которые будут использованы для улучшения технологических процессов в металлургии и материаловедении. Эксперимент подчеркнул важность подбора правильных параметров для термообработки, чтобы максимизировать эффективность и свойства получаемых материалов.

2.6.3 Определение минимального радиуса изгиба

При испытаниях на изгиб Т0 образцов толщиной 0,46, 0,82 и 0,92 мм дефектов в месте изгиба не обнаружено. Однако, образцы толщиной менее 0,46 мм ведут себя иначе - в месте изгиба образуются трещины и дефект в виде «апельсиновой корки». Для предотвращения появления данных повреждений для толщин 0,25, 0,3, 0,33, 0,46 были рассчитаны оптимальные радиусы изгиба, при которых не происходит разрушения исследуемых образцов.

Для вычисления минимального радиуса изгиба с помощью электронного микроскопа (РЭМ) JEOL 6390А были сделаны фотографии образцов в месте изгиба. Далее с помощью программы КОМПАС-3d были проведены измерения радиуса (R) изгиба и толщин (t) образцов. Для вычисления минимального радиуса гибки, при котором не происходит разрушение, использовали среднее значение радиуса (R_{cp}) и толщины (t_{cp}).

Для определения масштаба использовали формулу 2.2:

$$x = \frac{t_{cp} \cdot 100}{t}, \quad (2.2)$$

где t_{cp} – среднее значение толщины образца, полученное с помощью программы КОМПАС-3d;

t – толщина образца в реальности.

После определения масштаба находили реальный радиус (r) по формуле 2.3:

$$r = \frac{R_{cp}}{x}, \quad (2.3)$$

где R_{cp} – среднее значение радиуса, полученное с помощью программы КОМПАС-3d;

x – масштаб.

2.7 Моделирование процесса изгиба с углом 180° в программе DEFORM

Deform-3D — это система конечно-элементного моделирования, разработанная компанией Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC). Она предназначена для анализа трёхмерного течения металла при различных процессах обработки металлов давлением.

С помощью Deform можно точно прогнозировать характер формоизменения с минимальными затратами на экспериментальные проверки.

Программа позволяет моделировать процессыковки, выдавливания, протяжки, механообработки, высадки, прессования, прокатки, вытяжки и осадки.

В Deform есть собственный сеточный построитель, который автоматически разбивает сетку конечных элементов во время моделирования (адаптивное перестроение сетки). Также в программе есть библиотека оборудования для горячей и холодной штамповки.

Программный комплекс DEFORM3D имеет средства прогнозирования разрушения при холодной штамповке. Критерием является критерий Cockroft@Latham [104], рассчитываемый по формуле 2.4:

$$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} \quad (2.4)$$

Где $\bar{\varepsilon}$ — накопленная пластическая деформация, $d\bar{\varepsilon}$ — приращение накопленной деформации, σ^* - максимальное главное растягивающее напряжение, $\bar{\sigma}$ — интенсивность напряжений.

С помощью данного программного комплекса был промоделирован процесс изгиба алюминиевых образцов толщиной 0,25, 0,3, 0,33, 0,46, 0,82, 0,92 на 180°.

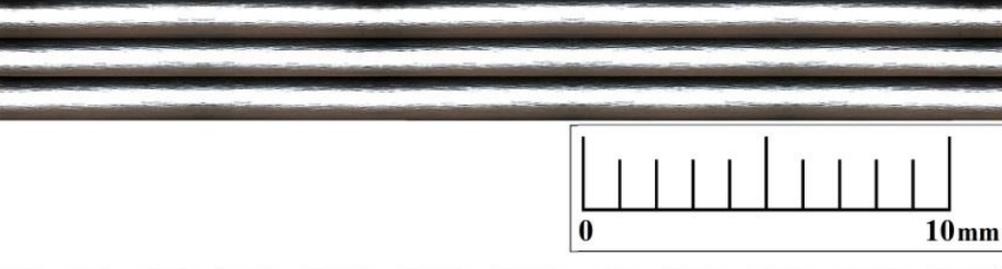
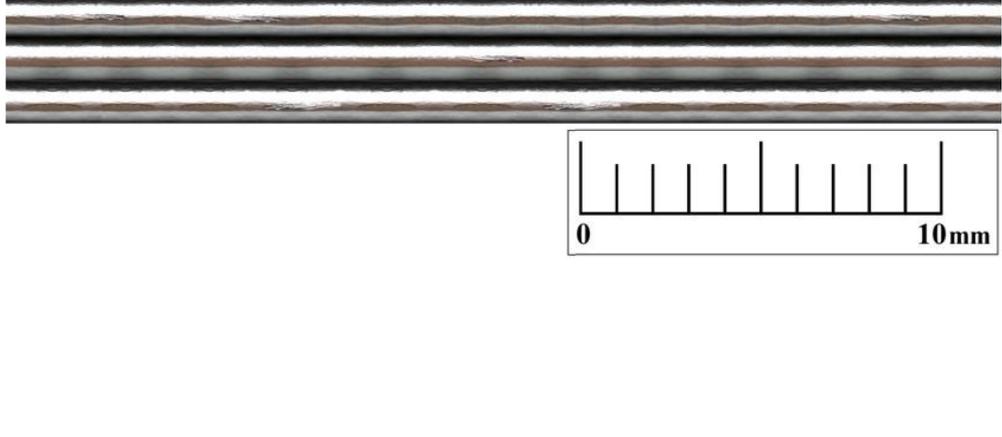
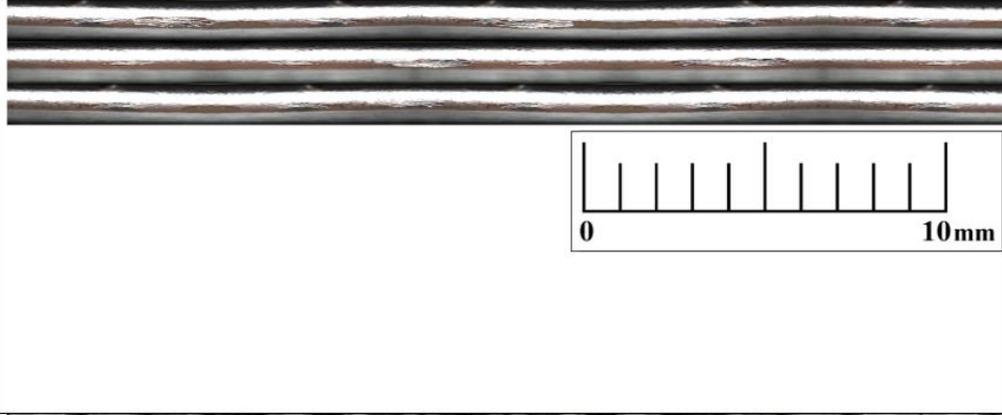
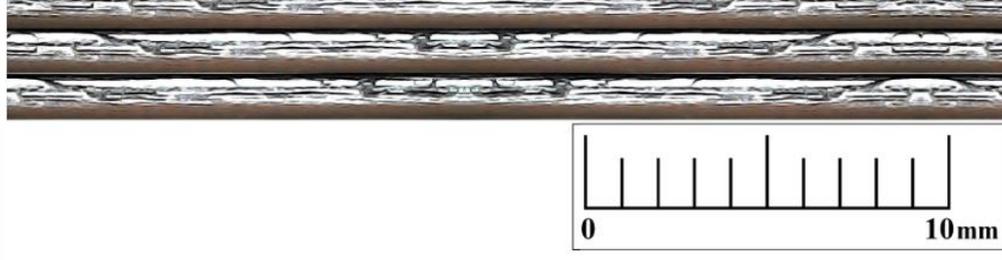
2.8 Количественная оценка пригодности листов к гибочным операциям

Традиционным для оценки пригодности листов к гибочным операциям является испытание на перегиб [104], где оценивается рельеф поверхности, но это

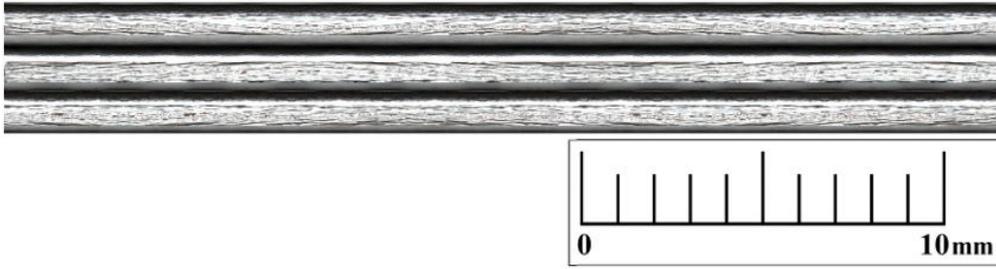
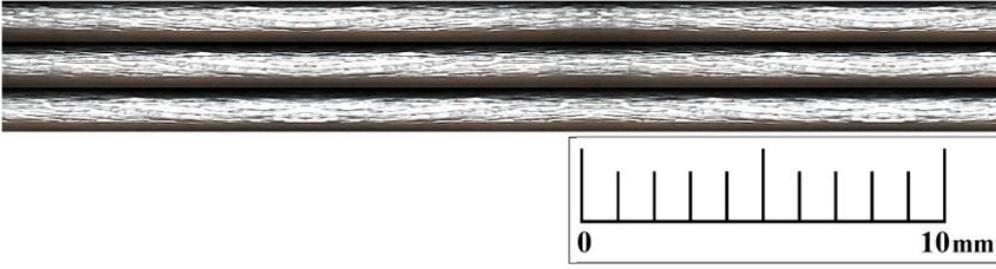
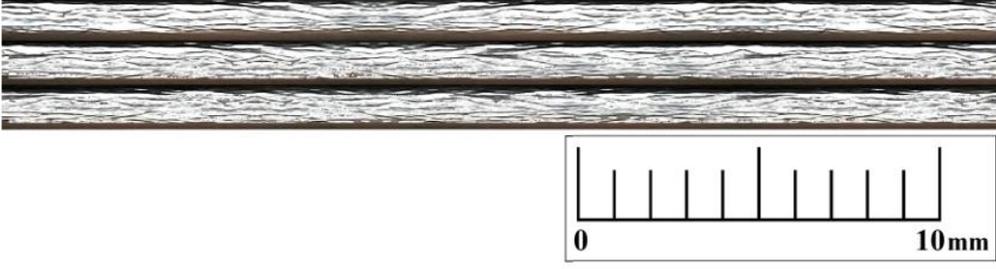
проходит на качественном уровне. Для количественной оценки пригодности листового алюминия к гибочным операциям в данном исследовании предлагается выполнить оценку штампуемости следующим образом: если при перегибе не происходит изменение рельефа, т.е. он остаётся гладким, будем полагать, что это хорошая штампуемость, лист обладает хорошей пригодностью к гибочным операциям, балл штампуемости максимальный и равен 10. При появлении на изгибе большого числа трещин, в том числе сквозных, будем считать, что пригодность к операциям гибки низкая и будем присваивать этой штампуемости 0 баллов. Все остальные сочетания, с единичными несквозными трещинами и волнистостью в виде «апельсиновой корки» с различной высотой волны, будут находиться между двумя этими вариантами.

Количественную оценку штампуемости проводили с помощью балловой системы оценки рельефа поверхности изгиба [105], для этого образцы были изогнуты на 180° и зажаты в тиски так, чтобы две стороны изгиба плотно прилегали друг к другу. Далее был проведен визуальный осмотр места изгиба образцов металла толщиной 0,25, 0,46 и 0,82 мм в холоднокатаном и отожженном состояниях с применением лупы, стереомикроскопа и USB-камеры с увеличением до 20 крат. Методика заключается 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 волнистости с большей высотой волны, а наличие трещин будет приводить к снижению балла штампуемости. Типы рельефа поверхности изгиба листов и лент алюминиевых сплавов А5, 3005, 5182 при гибке с углом изгиба 180° классифицированы и представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Классификация типов рельефа поверхности изгиба листов и лент из алюминиевых сплавов при гибке с углом 180° [105]

Тип	Фотография	Описание типа
А 0 Т 0		<p>Гладкая поверхность</p> <p>В месте изгиба гладкая поверхность, отсутствуют дефект «апельсиновая корка» и трещины Балл штампуемости 10</p>
Т 1		<p>Гладкая поверхность с единичными трещинами</p> <p>В месте изгиба гладкая поверхность с единичными короткими не сквозными трещинами (1-3 шт. на 200 мм) Балл штампуемости 4-6 (-4-6 баллов от максимально возможной)</p>
Т 2		<p>Гладкая поверхность со множеством трещин</p> <p>В месте изгиба гладкая поверхность со множеством коротких не сквозных трещин (более 4 шт. на 200 мм) Балл штампуемости 1-3 (+1...+3 балла к минимальной)</p>
Т 3		<p>Сквозные трещины по всему изгибу</p> <p>В месте изгиба сквозные трещины по всему изгибу Балл штампуемости 0</p>

Продолжение таблицы 2.7

А 1		<p>«Апельсиновая корка» с легкой волной</p> <p>В месте изгиба дефект «апельсиновая корка» с лёгкой волной</p> <p>Балл штампуемости 8-9 (-1...-2 балла от максимальной)</p>
А 2		<p>«Апельсиновая корка» со средней волной</p> <p>В месте изгиба дефект «апельсиновая корка» со средней волной</p> <p>Балл штампуемости 7-8 (-2...-3 балла от максималльно)</p>
А 3		<p>«Апельсиновая корка» с высокой волной</p> <p>В месте изгиба дефект «апельсиновая корка» с высокой волной</p> <p>Балл штампуемости 5-6 (-4...-5 от максимальной)</p>

При одновременном проявлении различных вариантов рельефа (лёгкая волна «апельсиновой корки», высокая волна «апельсиновой корки», единичные трещины) штампуемость определяется добавлением или вычитанием баллов, соответствующих выявленным дефектам и вычислению среднего арифметического. Пример определения балла штампуемости представлен на рисунке 2.5

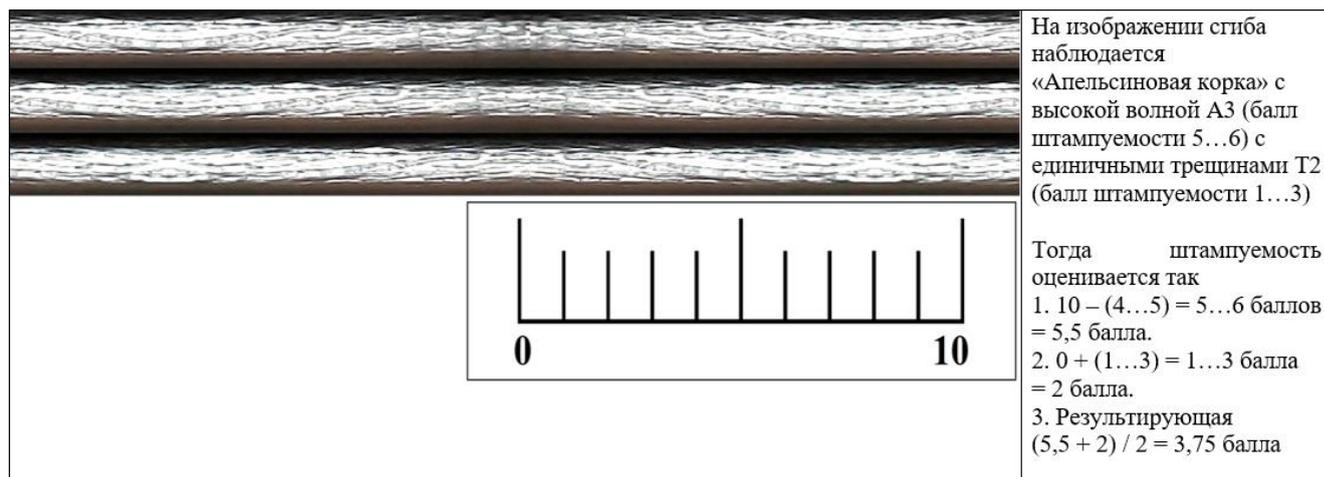


Рисунок 2.5 – Пример определения балла штампуемости

2.9 Проведение микроструктурного анализа

Для проведения металлографического анализа использовались микрошлифы, приготовленные из различных образцов, подвергнутых холодной прокатке и последующему отжигу в разных условиях. Микрошлифы были изготовлены с участков, соответствующих очагам деформации, что позволяло более детально изучить структуру материала.

Для подготовки поверхности образцов к исследованию применялась абразивная обработка с использованием наждачных бумаг и полировка на шлифовальном круге с применением пасты Гойя. Этот этап позволял удалить поверхностные дефекты и получить гладкую поверхность для более точного анализа.

Структура одной из поверхностей образцов для исследования подвергалась последовательному шлифованию, полировке и травлению. Травление проводилось с применением специального состава, включающего плавиковую кислоту HF – 2%, азотную кислоту HNO₃ – 3% и воду H₂O – 95%. Время травления определялось экспериментальным методом и варьировалось от 5 до 60 секунд в зависимости от типа термической обработки, что позволяло подчеркнуть особенности структуры материала.

Проведение исследования структуры материалов - это сложный и многоэтапный процесс, который требует использования специализированных

инструментов и оборудования. В рамках нашего исследования мы использовали металлографический микроскоп METAM PV и микроскоп INCA для изучения выбранных микрошлифов с увеличением до 500 раз. Полученные изображения структуры были зафиксированы на фотографиях с целью последующего детального анализа.

Измерение размеров зёрен и включений на полученных фотографиях дало возможность провести анализ изменений структуры образцов в зависимости от различных состояний поставки и воздействия различных факторов. По фотографиям структуры образцов в различных состояниях поставки были измерены размеры (L) и рассчитаны деформации зёрен по длине образца для каждого микрошлифа.

Это исследование позволило не только определить влияние термической обработки и пластической деформации на структуру материала, но также выявить особенности формирования механических свойств в зависимости от условий обработки. Результаты этого анализа могут быть важным вкладом в развитие методов контроля качества и улучшения производственных процессов.

2.10 Определение кристаллографической текстуры

Исследование текстурных измерений начиналось с вырезания образцов из срединных плоскостей листа и построения полюсных фигур на них. Плоскость, на которой проводилась съёмка полюсных фигур, была ориентирована параллельно плоскости термомеханической обработки. Методом "на отражение" с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в $\text{CoK}\alpha$ -излучении (см. рисунок 2.6) была изучена текстура, представленная трёмя неполными полюсными фигурами $\{220\}$, $\{311\}$, $\{331\}$.

Для проведения исследования использовались широкие диапазоны углов наклона α (от 0 до 70°) и поворотов β (от 0 до 360°) с шагом в 5°. Такой подход позволил получить более детальное представление о структуре и характере текстуры материала. Проведенные эксперименты позволили сделать выводы о

влиянии различных параметров на формирование текстуры в исследуемом материале.

Исследуемые образцы подвергались измерению для определения их состояния материала. Коррекцию падения интенсивности на периферийной части полюсной фигуры в связи с эффектом дефокусировки осуществляли с использованием специальных поправочных коэффициентов, которые были рассчитаны на основе условий рентгенографической съемки полюсных фигур. Для расчета функции распределения ориентировок (ФРО) использовали данные, полученные из измерений полюсных фигур, представляя их в виде суперпозиции множества (до 2000) стандартных распределений с одинаковым маленьким разбросом. Также на основе данной ФРО проводили расчет полных полюсных фигур и обратных полюсных фигур для трех взаимно перпендикулярных направлений в образце: направления нормали к плоскости деформации (НН), направления деформации (НП) и поперечного направления (ПН).



Рисунок 2.6 – Установка ДРОН-7

Изучив анализ сечений ФРО, полученных из экспериментальных полюсных фигур, мы можем прийти к выводу, что трехмерную функцию удобно представить как сумму стандартных функций, включая текстурные компоненты и идеальные

ориентировки с рассеянием. В этом представлении функция $f(g)$ может быть приближенно выражена как

$$f(\mathbf{g}) = \sum_{i=1}^N W_i f^s(\mathbf{g}, \mathbf{g}_i, \varepsilon_i), \quad (2.5)$$

где N – количество стандартных функций;

W_i –объемная доля i -й функции;

\mathbf{g}_i – положение ее центра;

ε_i – параметр рассеяния.

Каждая текстурная компонента подбирается в соответствии с анализом полюсных фигур ФРО, что позволяет более эффективно оперировать этими данными. Начнем с того, что созданный файл ориентировок содержит три Эйлеровых угла и предварительные параметры W_i и ε_i , которые подвергаются обработке с помощью программы Texhog. Этот процесс приводит к уточнению значений объемной доли ориентировок W_i . Выбор набора ориентировок производится на основе критерия адекватности, который определяется как минимальное значение среднеквадратичного отклонения между восстановленной по полюсным фигурам ФРО и суммой отдельных ориентировок, представляющих ФРО. Проведенные вычисления могут дать более точные результаты и помочь в дальнейшем анализе структуры материала.

2.11 Выводы по главе 2

Выполнено описание материалов, используемых в исследовании, приведены деформационные и термические режимы получения опытных образцов, описаны методики проведения экспериментальных исследований.

Исследование показало, что изменения в составе и размерах зерен, а также в содержании ключевых элементов, таких как магний и марганец, могут значительно влиять на структурную упорядоченность материала. В частности, было установлено, что количественные и качественные характеристики упрочняющих фаз изменяются вместе с концентрацией основных легирующих элементов. Это, в свою очередь, ведет к различиям в распределении и размерах фаз, что существенно

сказывается на характеристиках материала. Важно отметить, что фазовый состав и характер его распределения играют ключевую роль в формировании и изменении структуры. Кроме того, процесс рекристаллизации и изменение кристаллографической текстуры также зависят от того, какие элементы легируют систему и какова их степень.

Таким образом, комплексное взаимодействие между содержанием легирующих элементов, фазовым составом, и размером зерен определяет свойства материала на макроскопическом уровне. Эти данные могут быть использованы для разработки новых сплавов с заданными характеристиками. В итоге, понимание этой взаимосвязи позволяет оптимизировать процессы изготовления и улучшать эксплуатационные качества материалов.

Произведена классификация рельефа поверхности изгиба алюминиевых листов толщиной менее 1,0 мм, выделены основные типы рельефов.

Разработана методика, которая позволяет дать количественную оценку пригодности листового алюминия к гибочным операциям и штампуемости в зависимости от рельефа поверхности изгиба.

3 Моделирование процесса изгиба Т0 с углом 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»

Для тщательного анализа причин появления трещин в алюминиевых листах толщиной менее 0,46 мм было решено использовать моделирование. В ходе исследования применялась программа Deform для симуляции процесса гибки алюминиевых листов под углом в 180 градусов. Важной частью подготовки к моделированию стало создание равномерной поверхностной сетки конечных элементов, что способствовало точности и симметрии результатов.

В процессе гибки, каждая полка листа сгибалась до того момента, пока два края не соприкасались, формируя строгую 180-градусную загиб. Для получения более быстрых и точных результатов моделирования, лист был разделен на 1000 элементов. Это позволило эффективнее распределять нагрузки и анализировать поведение материала под воздействием силы. Свойства материала, используемого в расчетах, соответствовали алюминиевому сплаву с изотропными характеристиками. Это было сделано для того, чтобы результаты моделирования максимально приближались к реальным условиям эксплуатации материала.

Таким образом, благодаря применению детального и тщательного подхода к моделированию в программах специализированного назначения, стало возможно не только точно установить причины возникновения трещин, но и разработать методы их предотвращения, что может значительно увеличить срок службы алюминиевых изделий в промышленности.

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 значительное уменьшение очага деформации, при том, что

максимальные растягивающие напряжения в металле возрастают до величин, превышающих предел прочности для отожжённого алюминиевого сплава 3005, что вероятнее всего и приводит к возникновению трещин и волнистого рельефа поверхности изгиба.

Моделирование показало, что алюминиевые образцы толщиной 0,3, 0,33, 0,46, 0,82 и 0,92 мм выдерживают нагрузку и не разрушаются, а образец толщиной 0,25 мм был разрушен при гибке с углом 180 градусов.

В результате моделирования в Deform процесса изгиба T0 образцов алюминиевого сплава 3005 толщиной 0,25, 0,3, 0,33, 0,46, 0,82 и 0,92 мм получили максимальные напряжения и опасность разрушения. Результаты представлены на рисунках 3.1 – 3.12.

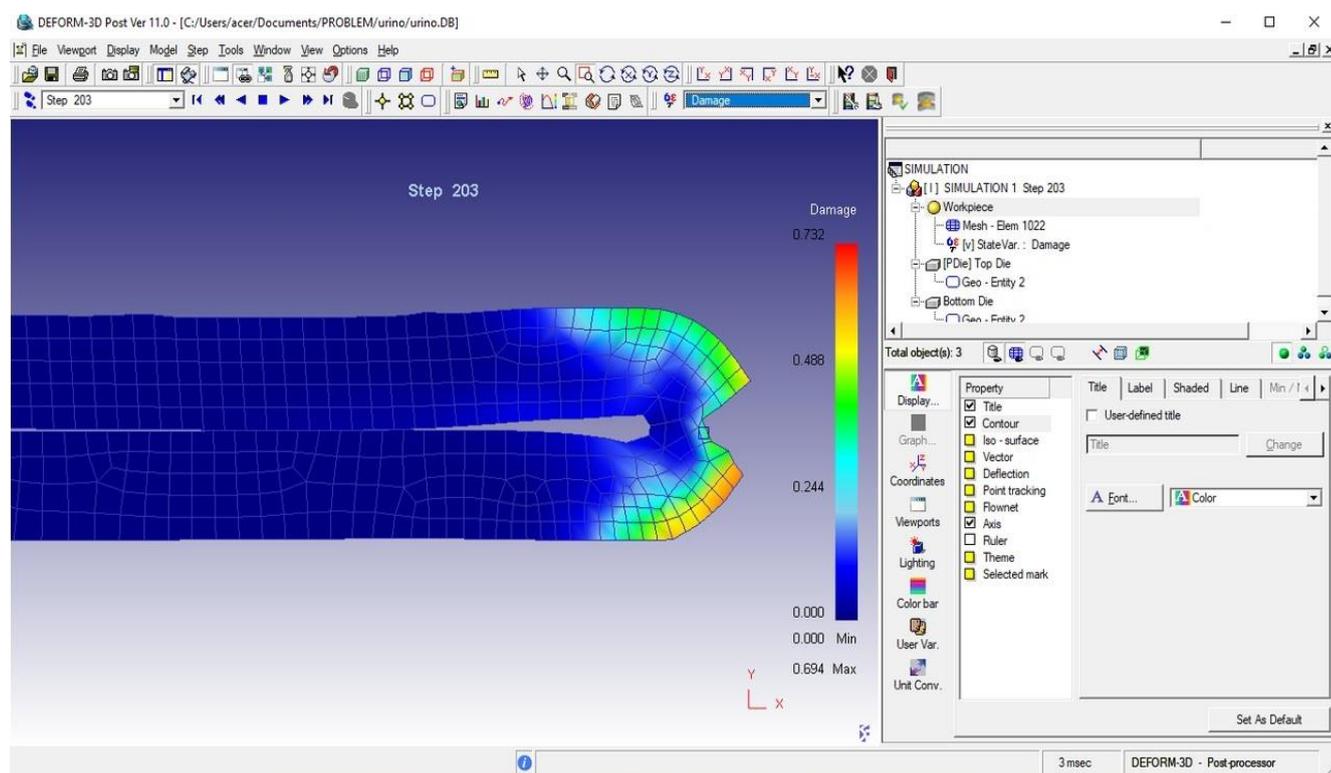


Рисунок 3.1 – Опасность разрушения при толщине 0,25 мм

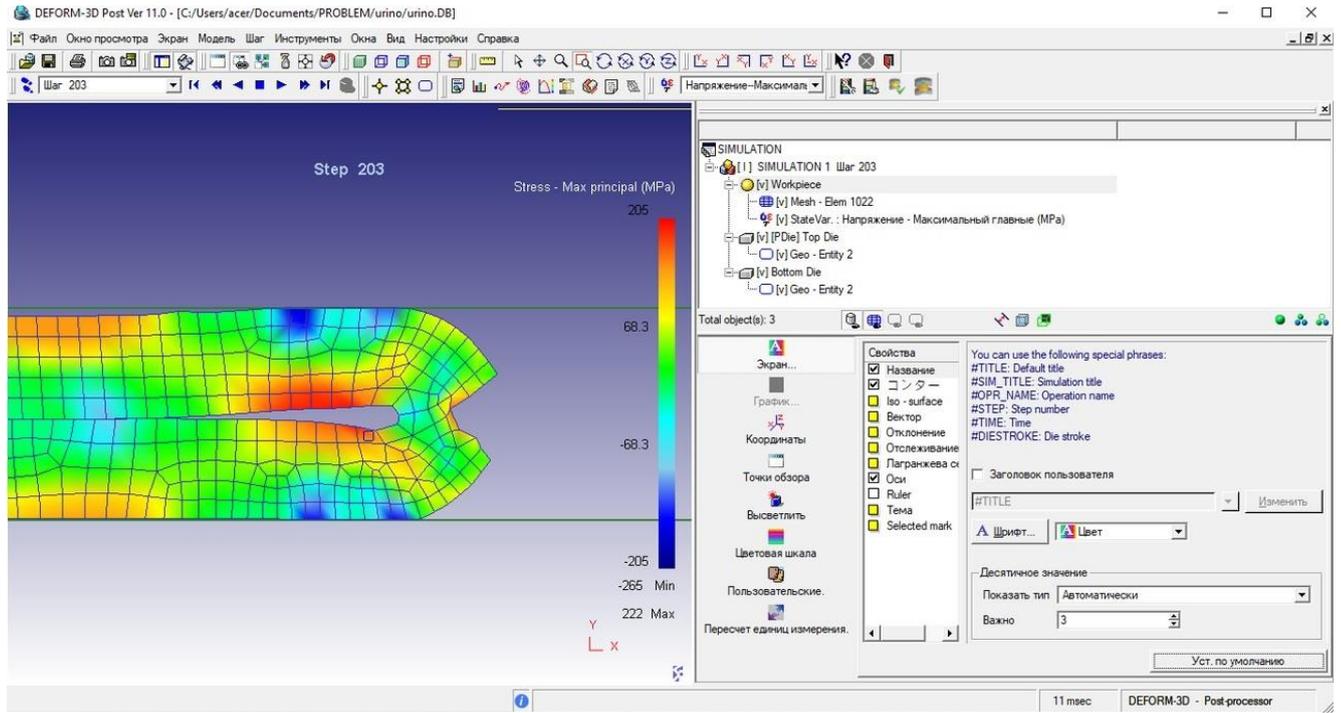


Рисунок 3.2 – Максимальное напряжение при толщине 0,25 мм

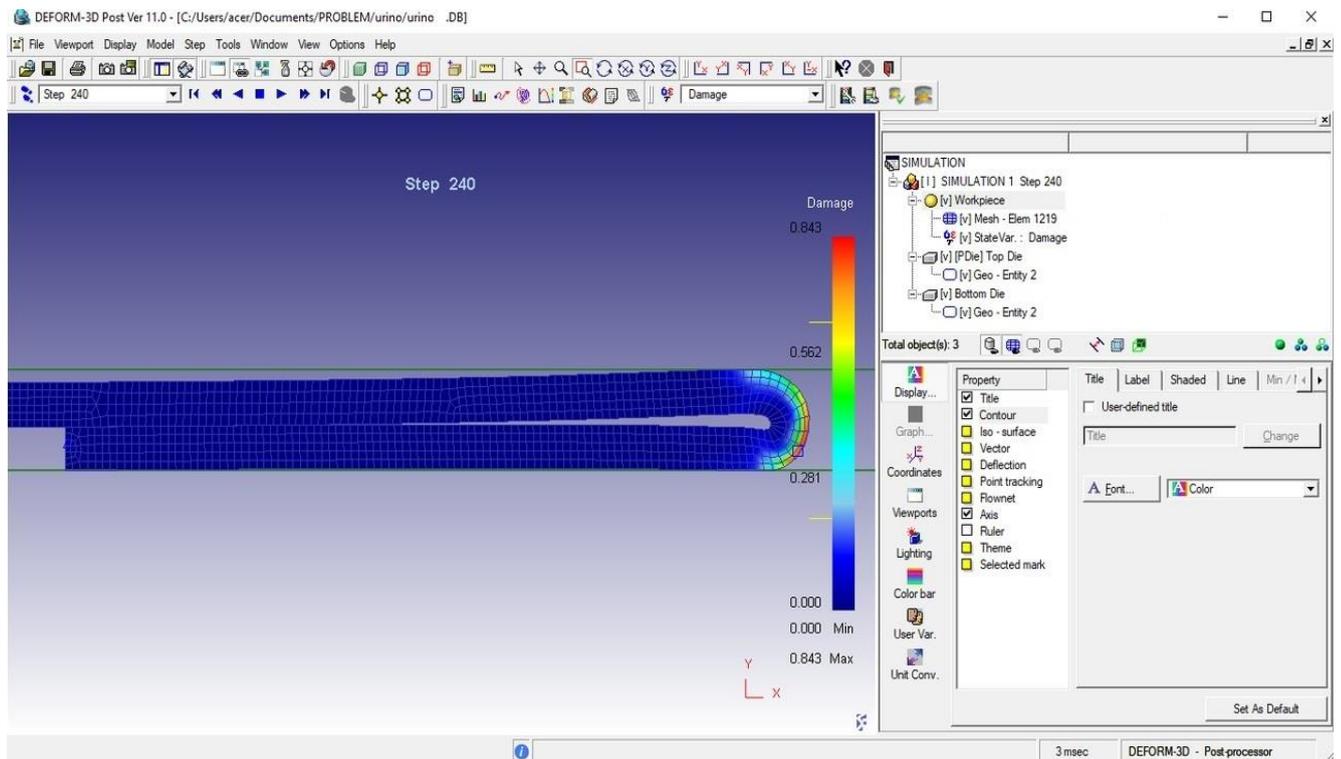


Рисунок 3.3 – Опасность разрушения при толщине 0,3 мм

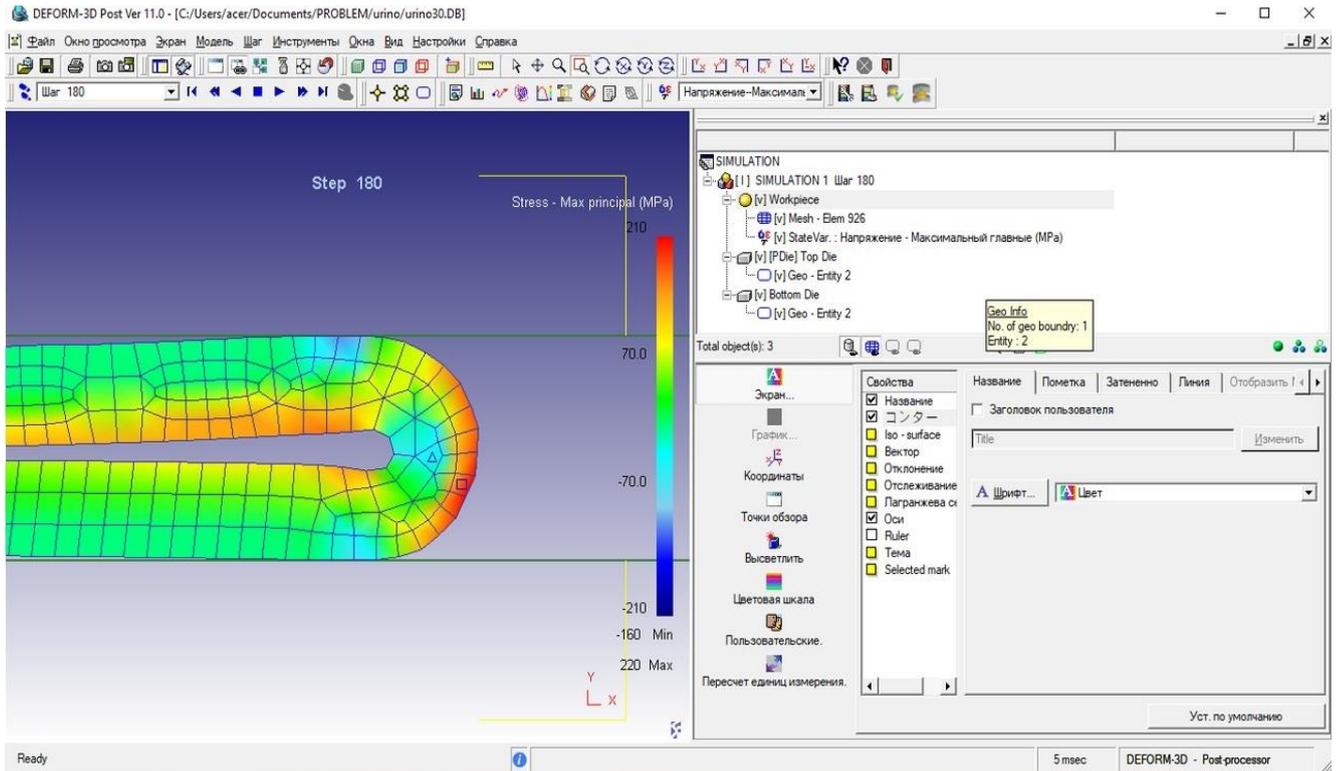


Рисунок 3.4 – Максимальное напряжение при толщине 0,3 мм

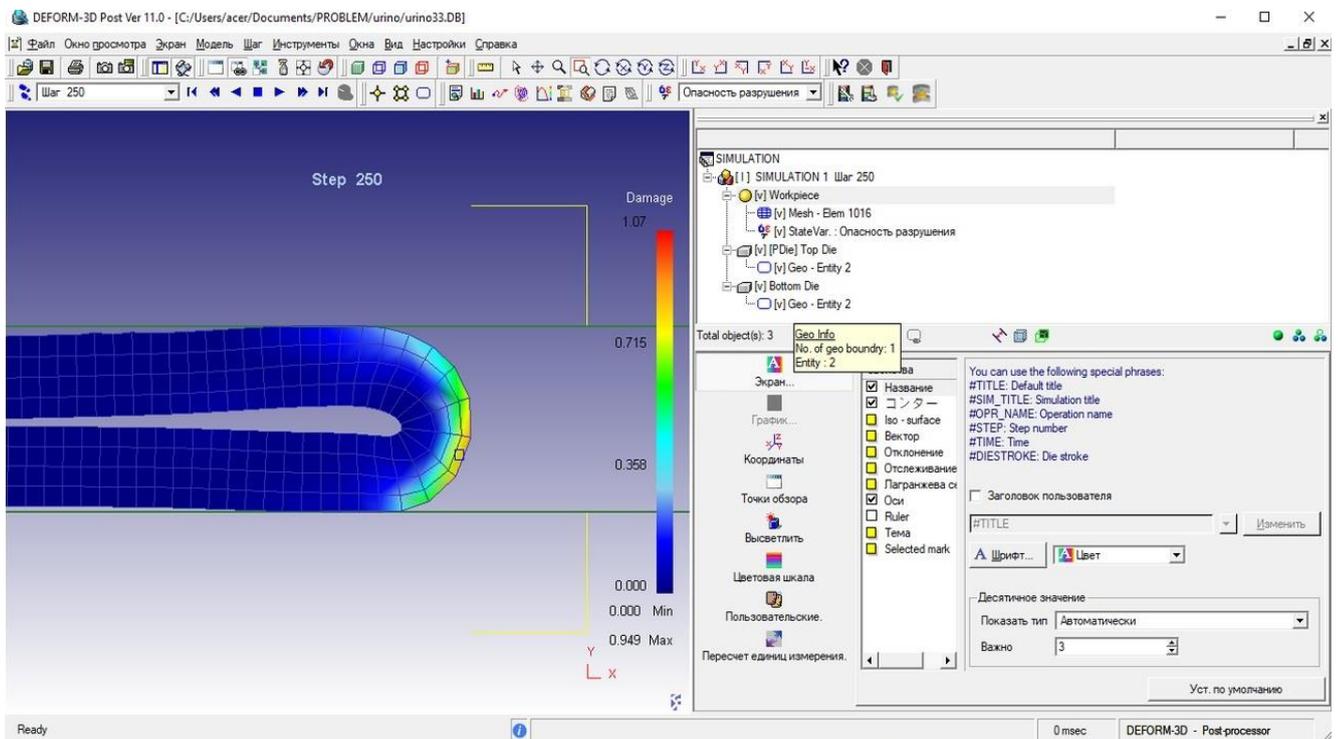


Рисунок 3.5 – Опасность разрушения при толщине 0,33 мм

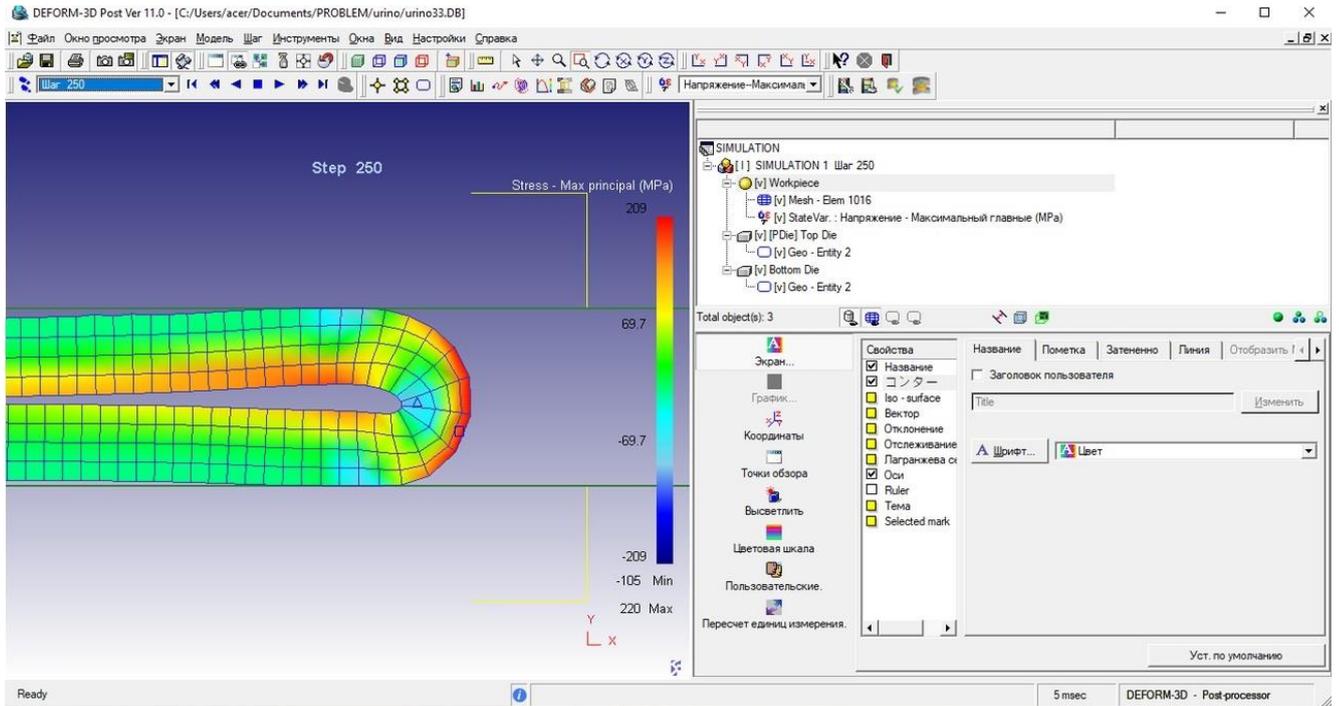


Рисунок 3.6 – Максимальное напряжение при толщине 0,33 мм

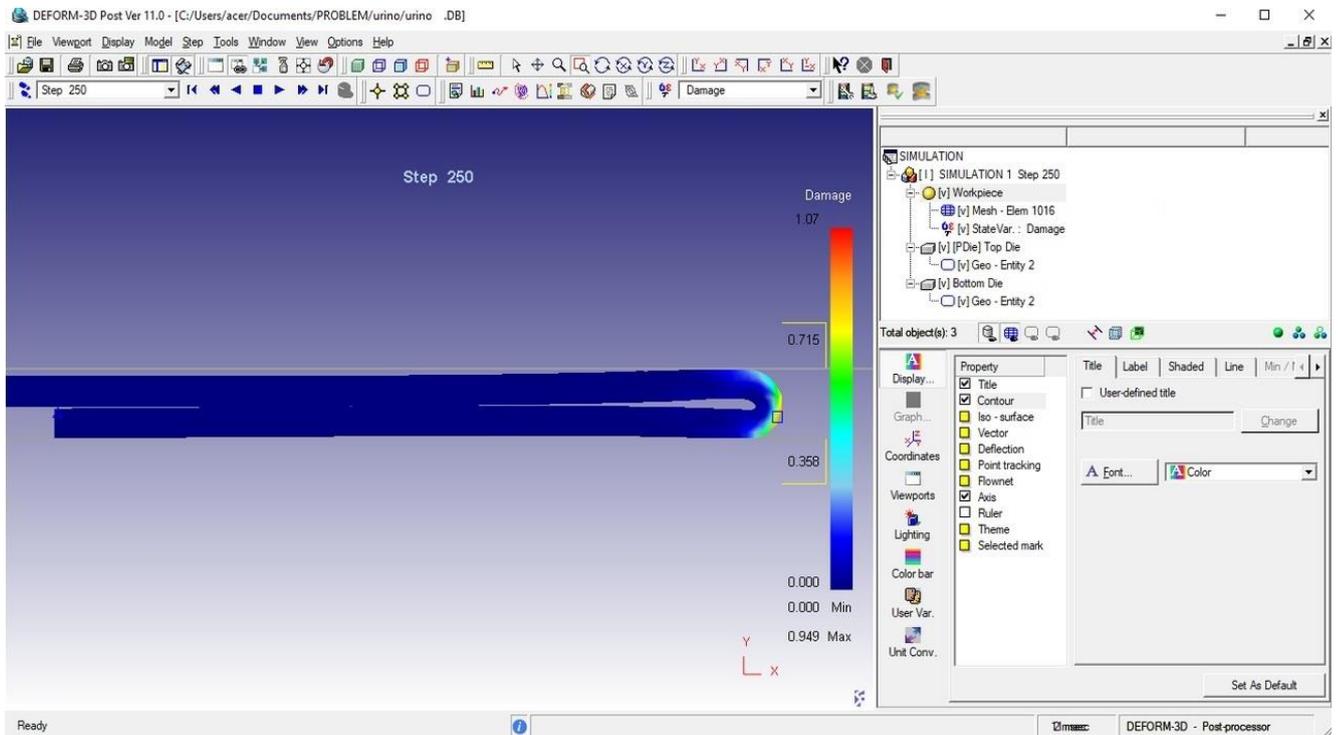


Рисунок 3.7 – Опасность разрушения при толщине 0,46 мм

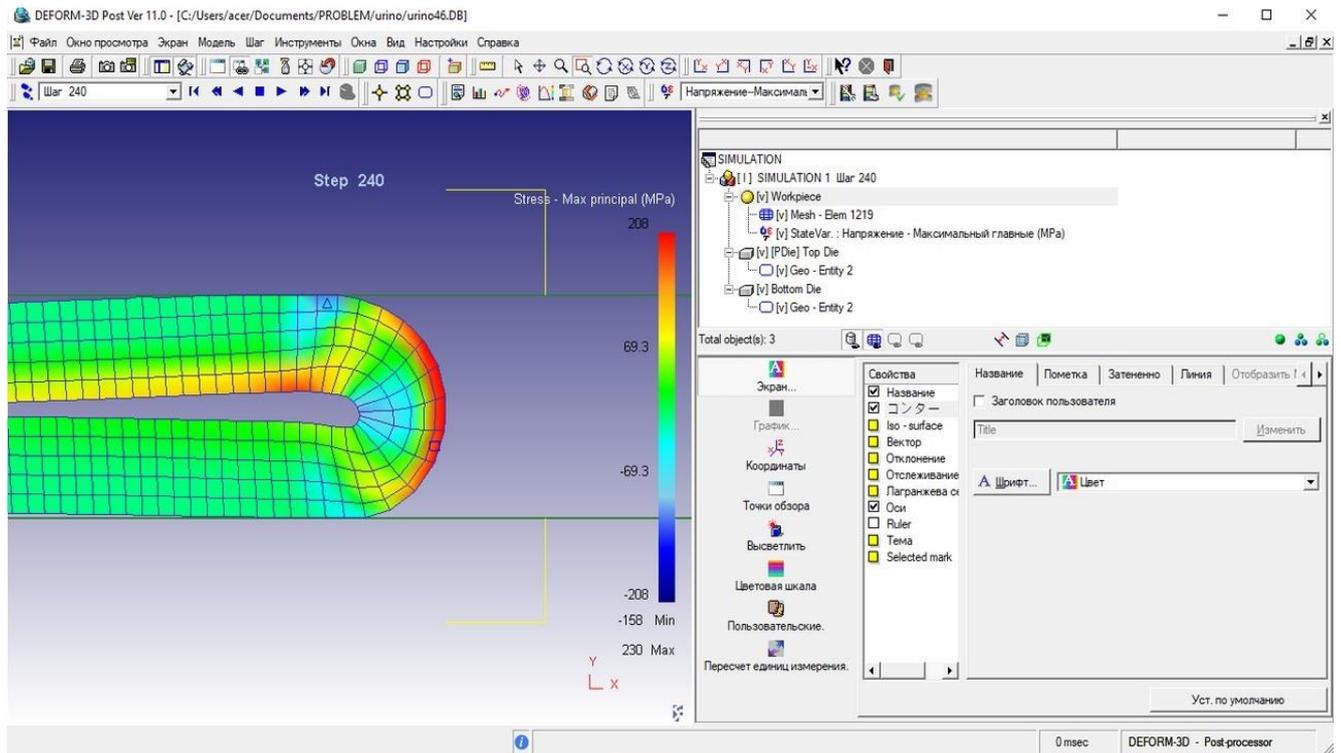


Рисунок 3.8 – Максимальное напряжение при толщине 0,46 мм

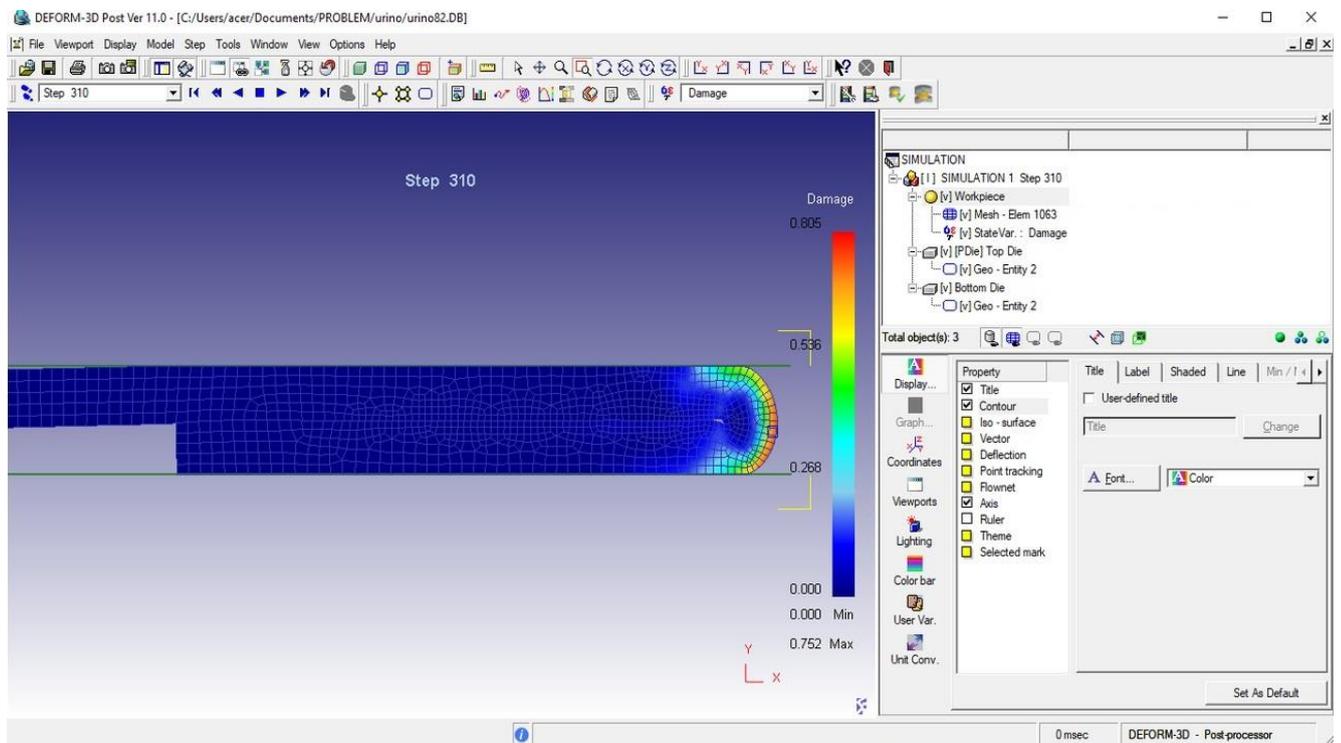


Рисунок 3.9 – Опасность разрушения при толщине 0,82 мм

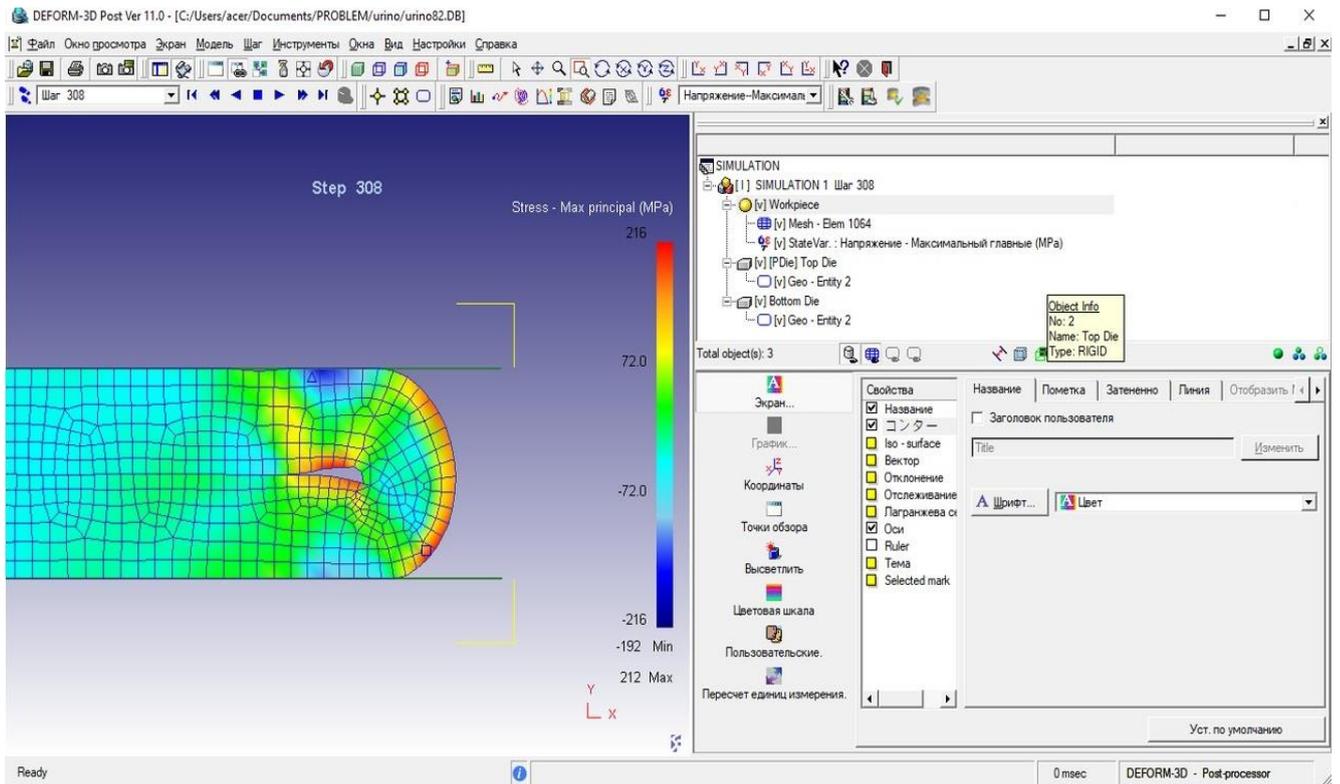


Рисунок 3.10 – Максимальное напряжение при толщине 0,82 мм

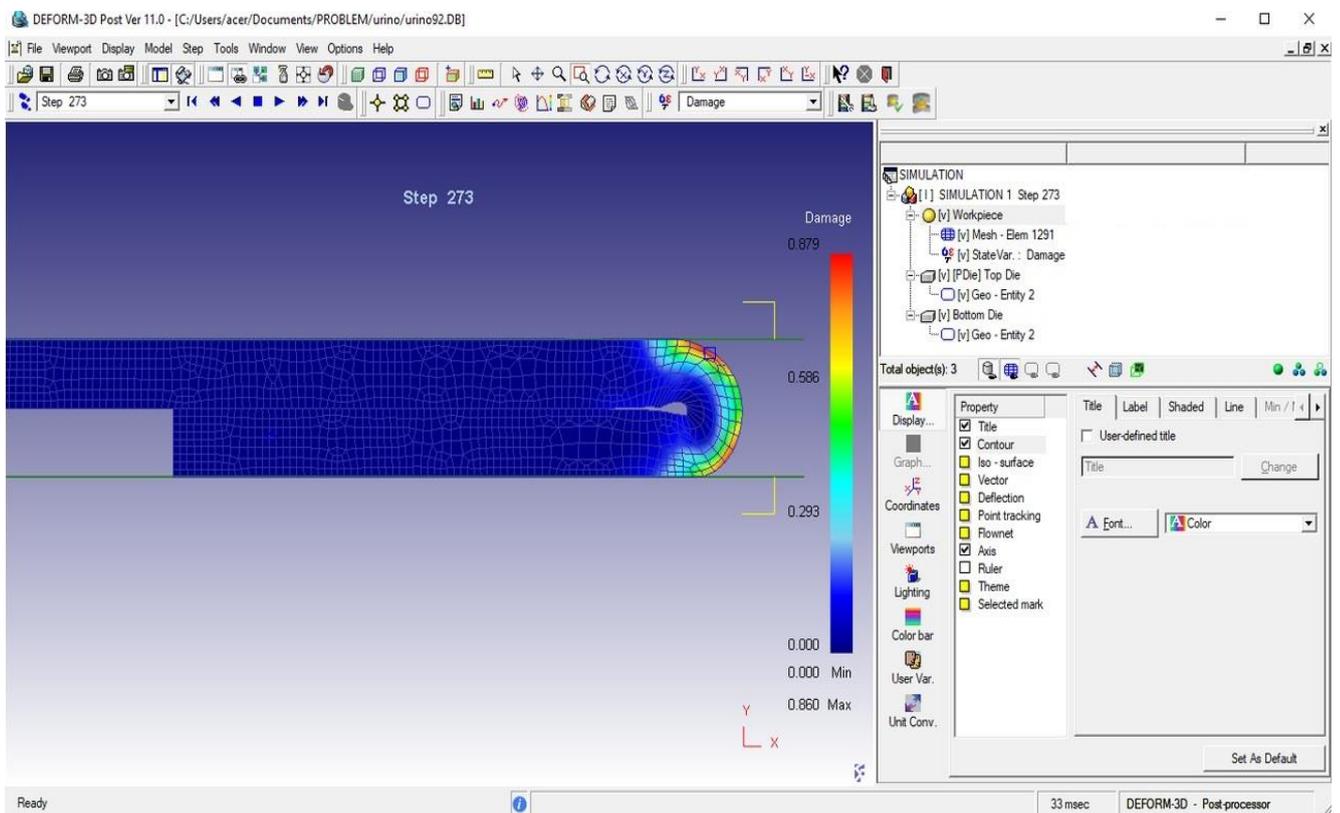


Рисунок 3.11 – Опасность разрушения при толщине 0,92 мм

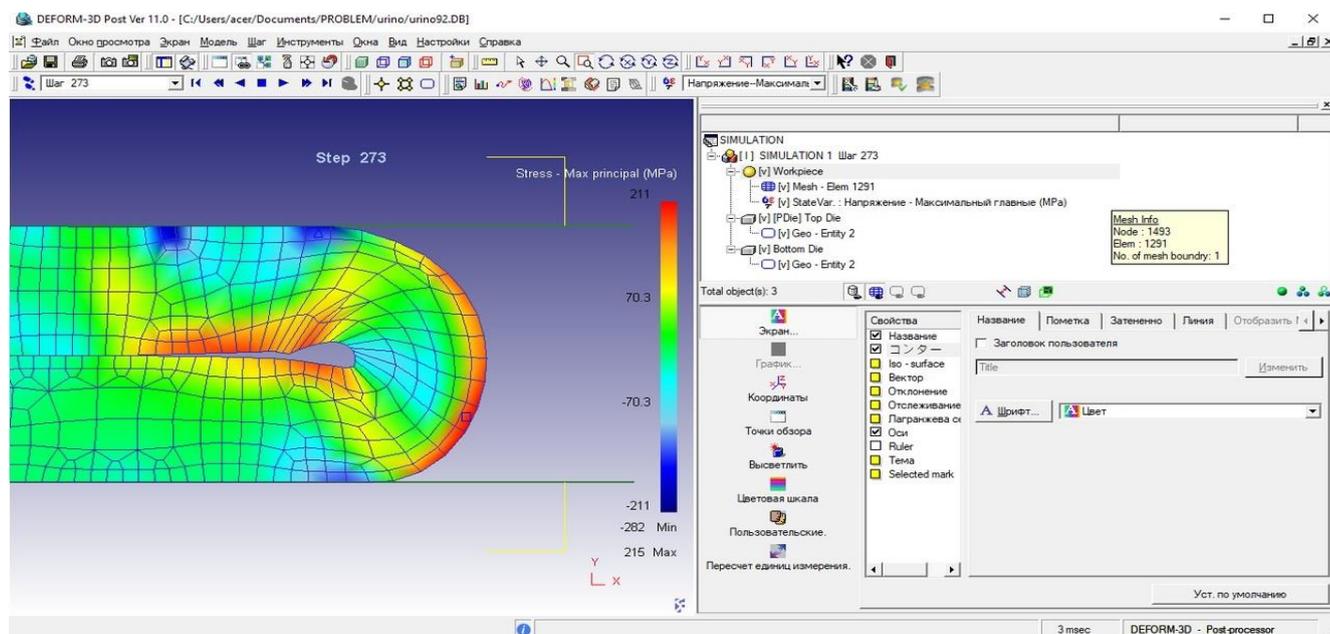


Рисунок 3.12 – Максимальное напряжение при толщине 0,92 мм

На основании результатов моделирования были построены графики зависимости длины очага деформации и максимальных растягивающих напряжений в поверхностном слое, представленные на рисунках 3.13 и 3.14.

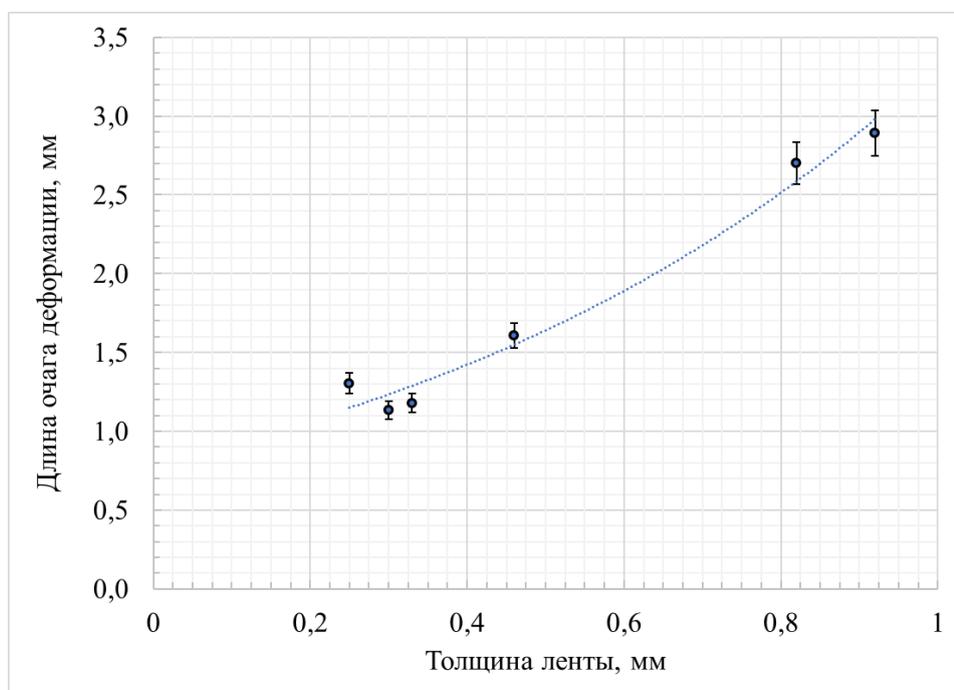


Рисунок 3.13 – Длина очага деформации

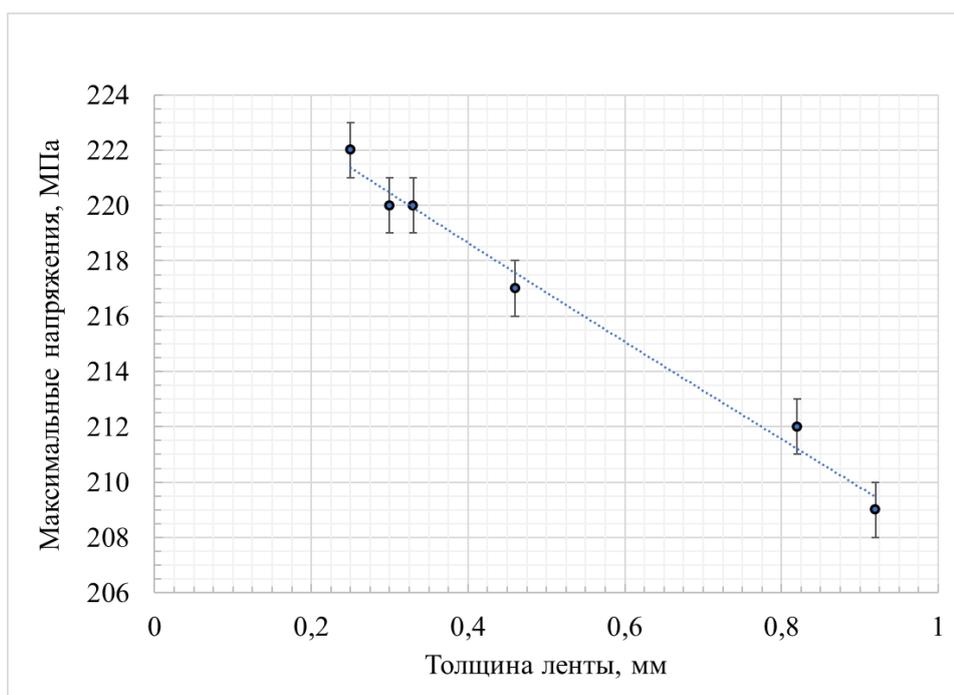


Рисунок 3.14 – Максимальные напряжения в поверхностном слое

Из рисунков 3.13, 3.14 видно, что уменьшение толщины ленты от 0,92 до 0,25 мм приводит к уменьшению очага деформации от 2,9 до 1,4 мм, однако деформация растяжения в поверхностном слое возрастает от 30 до 100% при этом напряжения возрастают от 209 до 222 МПа, что превышает предел прочности отожжённого сплава 3005.

Результаты моделирования полностью подтвердили данные практических экспериментов. Моделирование показало, что алюминиевые образцы толщиной 0,3, 0,33, 0,46, 0,82 и 0,92 мм успешно выдерживают нагрузку и не разрушаются, однако, при гибке под углом 180 градусов, экспериментальный образец толщиной 0,25 мм был разрушен. Несмотря на это, данный подход не позволяет выявить причину возникновения трещин и появления высоких волн на поверхности изгиба. Для решения этой проблемы необходимо установить закономерности, которые позволят улучшить штампуемость и гибкость алюминиевых листов толщиной менее 0,3 мм в зависимости от их состава, структуры, термической и деформационной обработки.

4 Влияние термической и деформационной обработки при получении тонких листов из сплавов 3005, 5182 и технического алюминия А5 на механические свойства и структуру

4.1 Изменение механических свойств проката в зависимости от степени пластической деформации

После проведения процессов отливки слитков и горячей прокатки, материалы подвергались холодной прокатке и отжигу в специальных печах согласно установленным режимам, которые были представлены в таблицах 2.4-2.6. Затем, на основе детального анализа диаграмм растяжения, были построены графики, иллюстрирующие изменение механических свойств сплавов А5, 3005 и 5182 в зависимости от степени деформации. Полученные результаты были наглядно представлены на рисунках 4.1 – 4.7.

Изучение влияния различных процессов на механические характеристики сплавов стало одной из ключевых задач данного исследования. Анализ полученных данных позволил выявить взаимосвязи между процессами обработки и изменением свойств материалов, что имеет важное значение для оптимизации технологических процессов и повышения качества конечной продукции.

Важно отметить, что полученные графики изменения механических свойств сплавов не только предоставляют информацию о поведении материалов при различных степенях деформации, но также могут служить основой для дальнейших исследований, направленных на совершенствование производства и разработку новых материалов с оптимальными характеристиками.

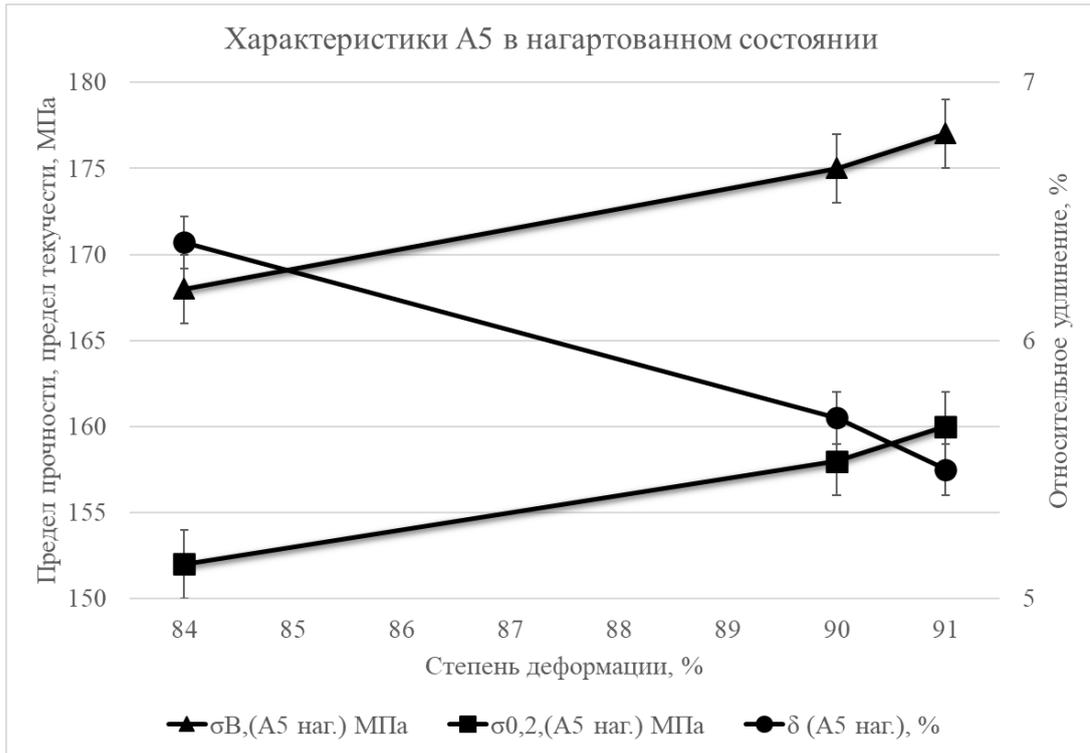


Рисунок 4.1 – Механические свойства сплава А5 в нагартованном состоянии

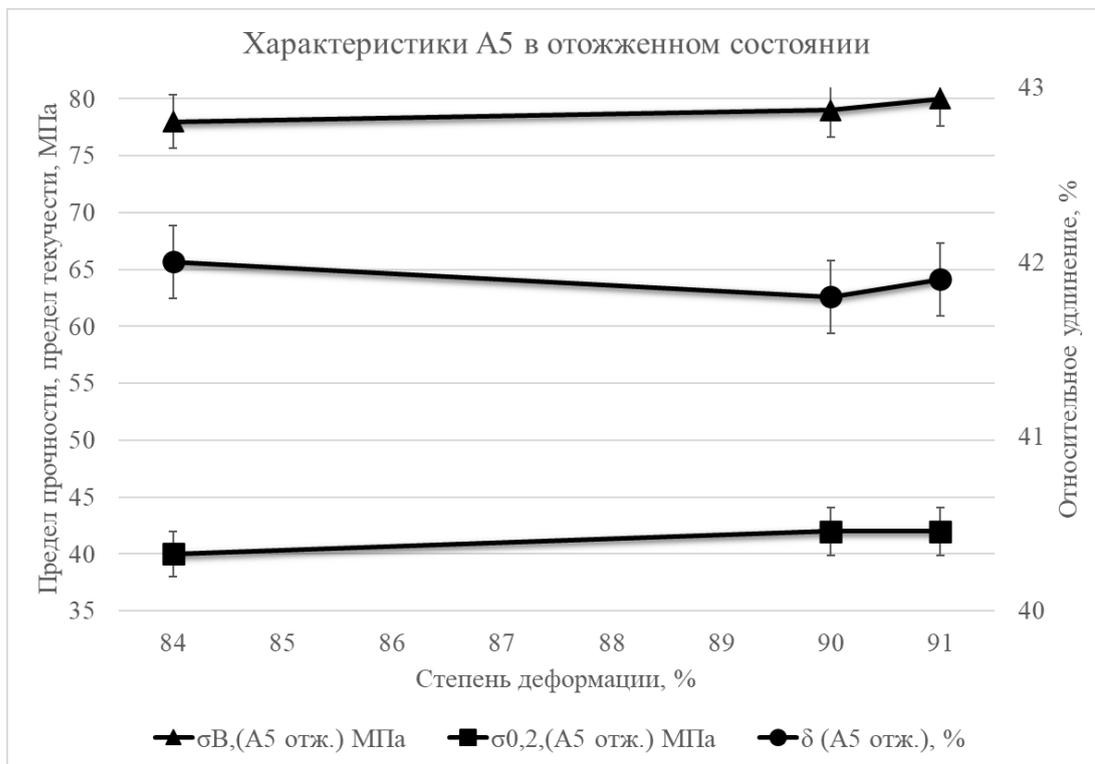


Рисунок 4.2 – Механические свойства сплава А5 в отожженном состоянии

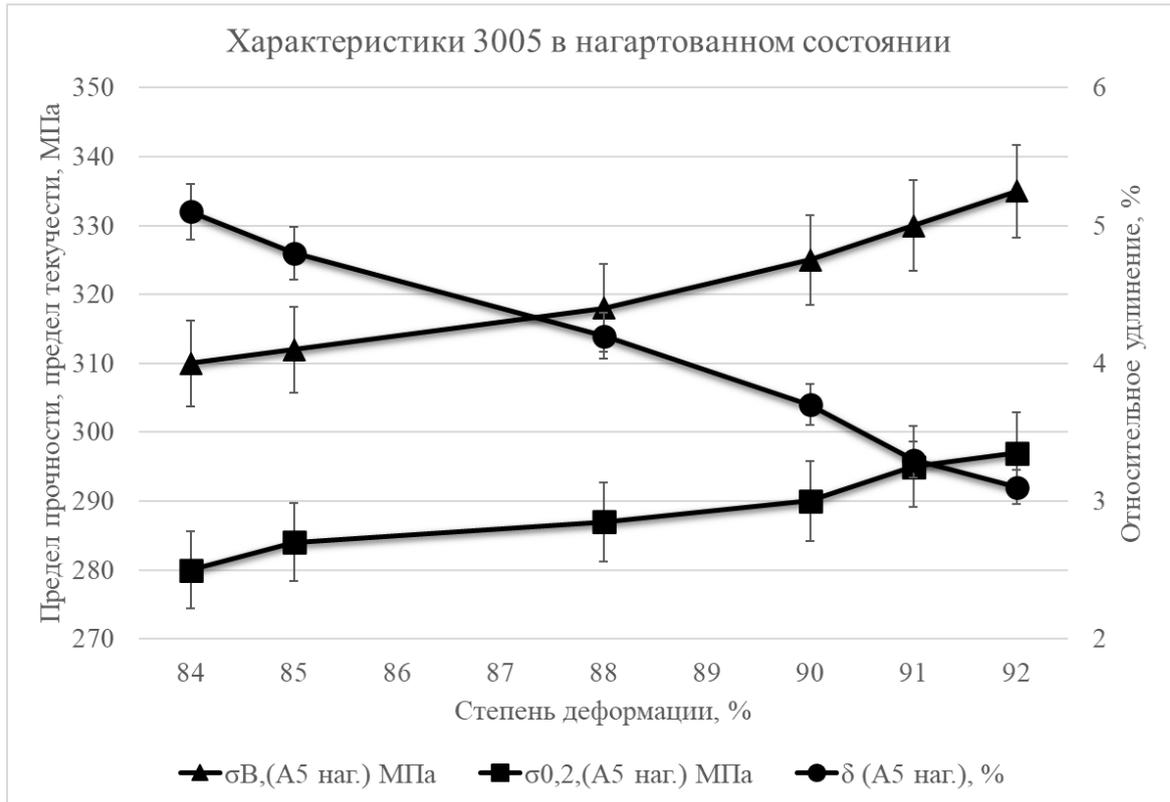


Рисунок 4.3 – Механические свойства сплава 3005 в нагартованном состоянии

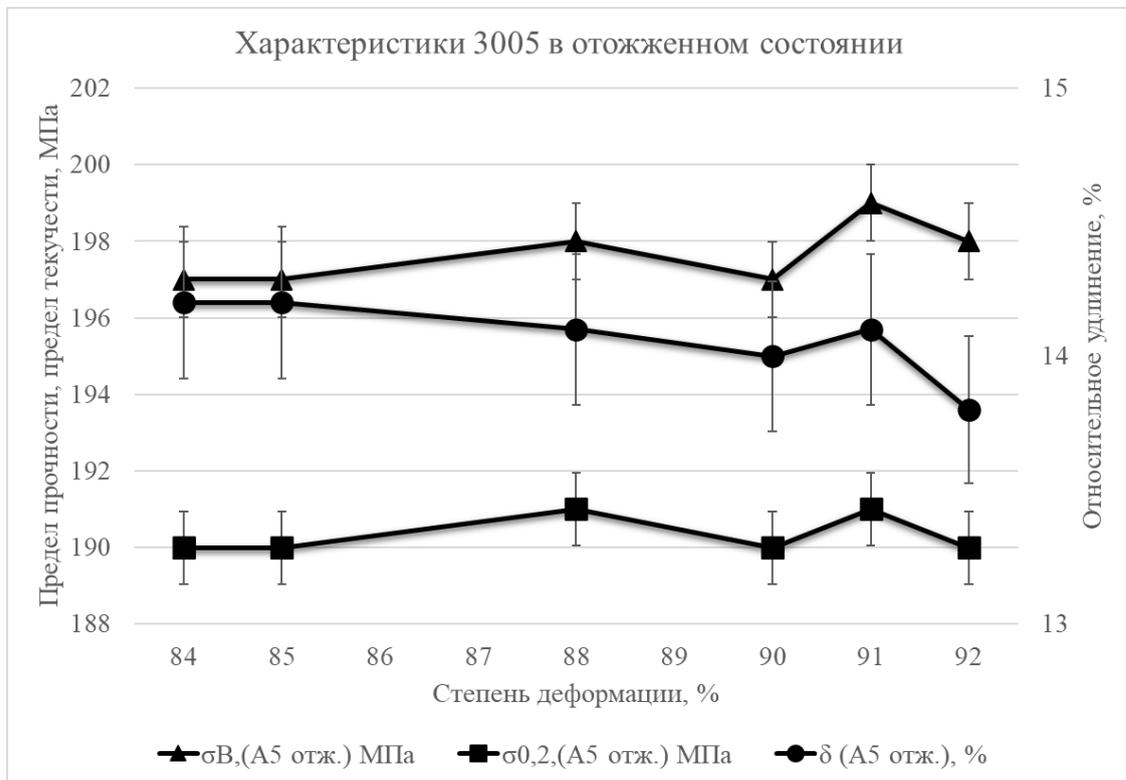


Рисунок 4.4 – Механические свойства сплава 3005 в отожженном состоянии

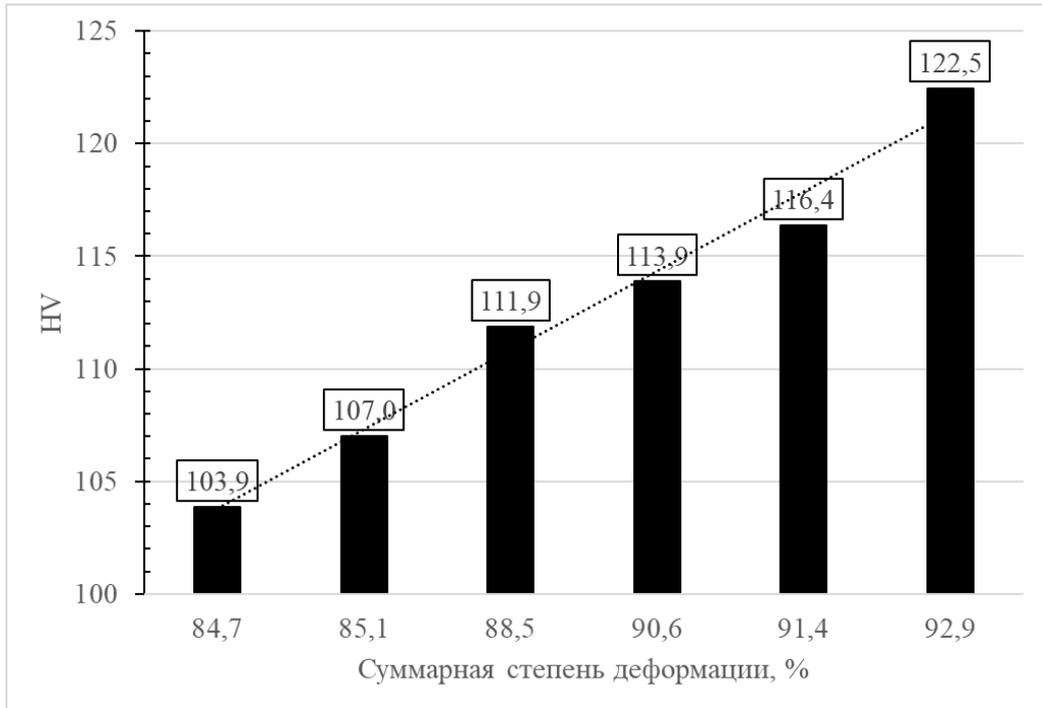


Рисунок 4.5 - Характер изменения твердости отожженных образцов из сплава 3005 в зависимости от степени деформации

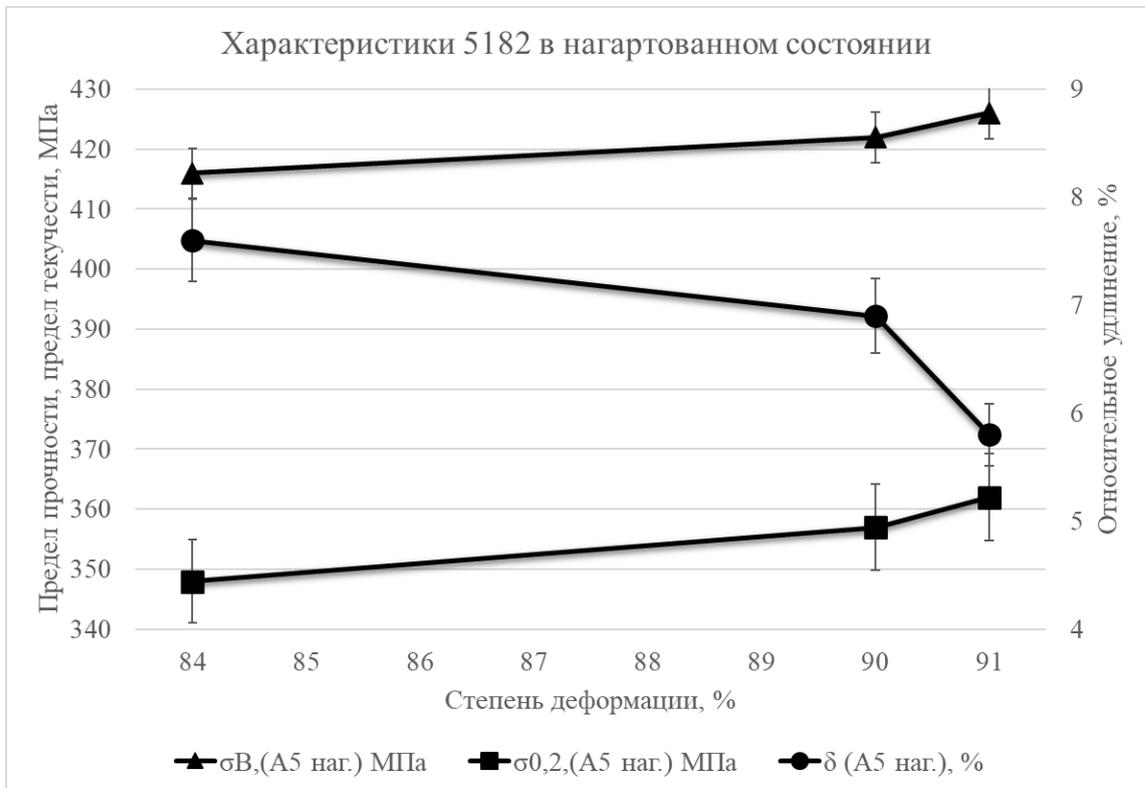


Рисунок 4.6 – Механические свойства сплава 5182 в нагартованном состоянии

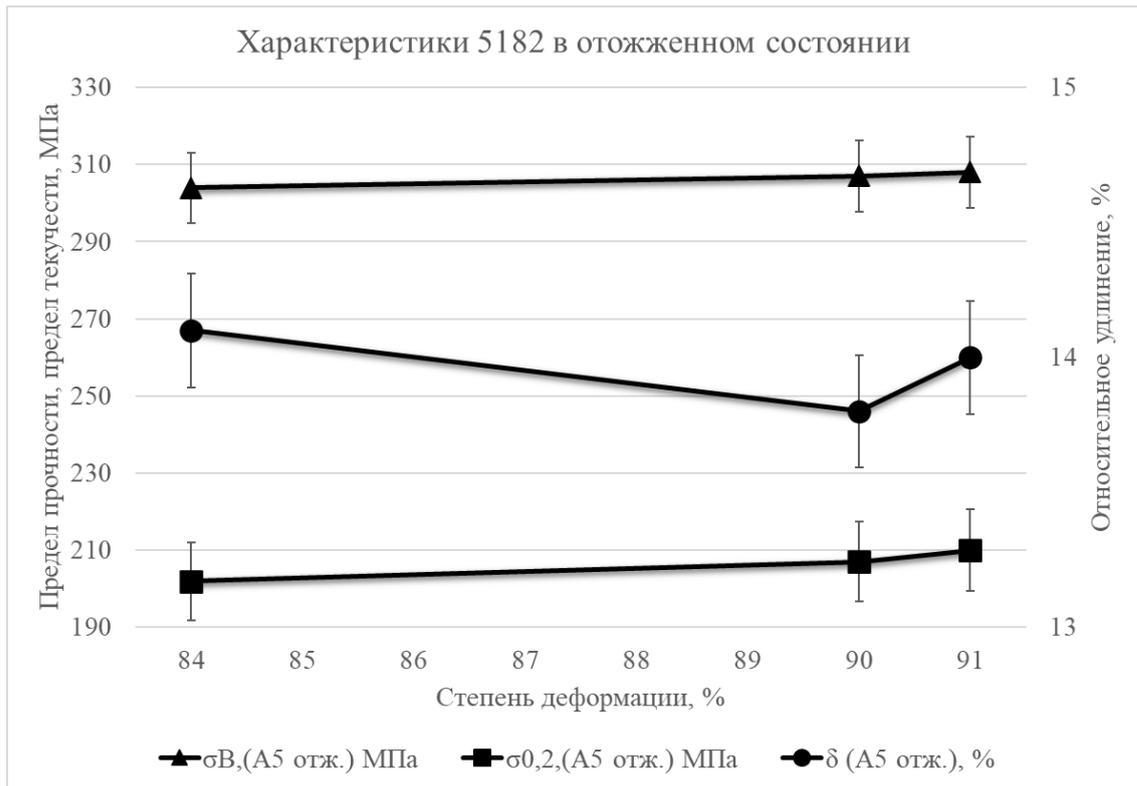


Рисунок 4.7 – Механические свойства сплава 5182 в отожженном состоянии

Анализ рисунков 4.1-4.7 показывает, что увеличение степени обжатия при получении тонких листов из исследуемых сплавов от 84 до 92% приводит к повышению прочности на 2...6% и снижению пластичности на 1..2%. Наиболее заметное упрочнение наблюдается у менее легированных сплавов. Проведение отжига приводит к снижению показателей прочности у технического алюминия более чем в 2 раза, у сплава 3005 в 1,5 раза, у сплава 5182 – в 1,3 раза. После отжига у сплавов повышается относительное удлинение: у технического алюминия в 6 раз, у сплава 3005 – в 4 раза, у сплава 5182 – в 2 раза. Однако при указанных обжатиях степень деформации практически не оказывает влияния на изменение свойств.

4.2 Изменение предела прочности, предела текучести и относительного удлинения в зависимости от условий термической обработки

Для оценки влияния способа отжига на механические свойства алюминиевых лент из сплава 3005 толщиной 0,25 мм, 0,33 мм, 0,46 мм и 0,82 мм произвели термическую обработку рулонов на линии непрерывной термообработки. Сравнительный анализ результатов, полученных при отжиге на ЛНТО и в садочных печах представлен на рисунке 4.8.

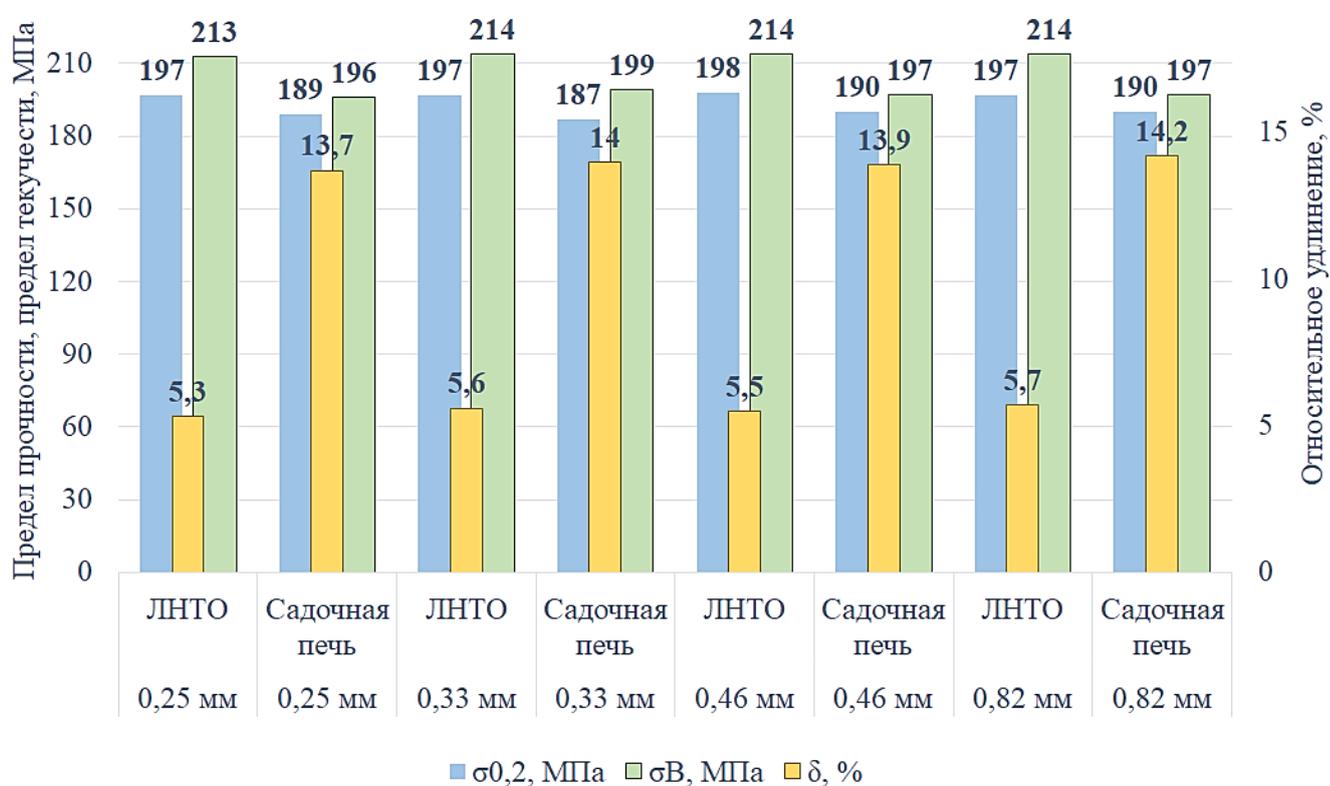


Рисунок 4.8 – Влияние способа отжига на механические свойства лент из сплава 3005

Из рисунка 4.8 видно, что проведение отжига на линии непрерывной термообработки 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.

4.3 Оценка влияния содержания марганца и магния на механические свойства алюминиевого сплава 3005

На основании полученных в ходе исследований результатов построены диаграммы разупрочнения, для ленты толщиной 0,25 мм – рисунок 4.9, для ленты толщиной 0,33мм – рисунок 4.10. Сплошными линиями на рисунках показаны данные для ленты, отожженной на ЛНТО, пунктирными – в садочных печах, утолщенные линии соответствуют лентам с повышенным содержанием магния и средним значением марганца, тонкие линии - прокату с повышенным содержанием магния и пониженным содержанием марганца. Как видно из рисунков, с повышением температуры отжига предел прочности и предел текучести снижаются, а относительное удлинение повышается для обеих толщин холодного проката. Повышенное на 0,05 масс% содержание магния и пониженное на 0,05 масс% марганца относительно средних значений приводит к получению пониженных значений на 1...2% относительного удлинения для всех температур отжига.

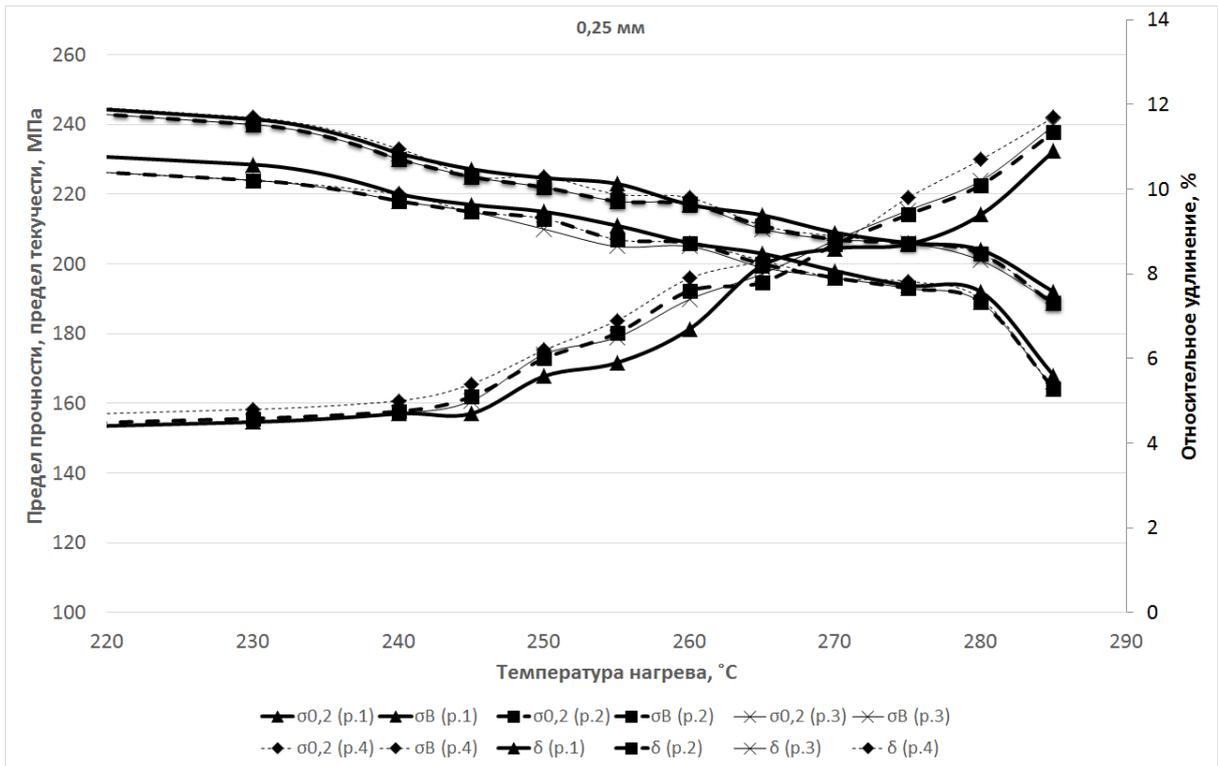


Рисунок 4.9 – Изменение предела прочности, предела текучести и относительного удлинения ленты толщиной 0,25 мм

Для толщины 0,33 мм влияние марганца и магния на относительное удлинение аналогично изменениям для ленты толщиной 0,25 мм и наиболее выражено наблюдается при температурах отжига до 250°C и выше 270°C.

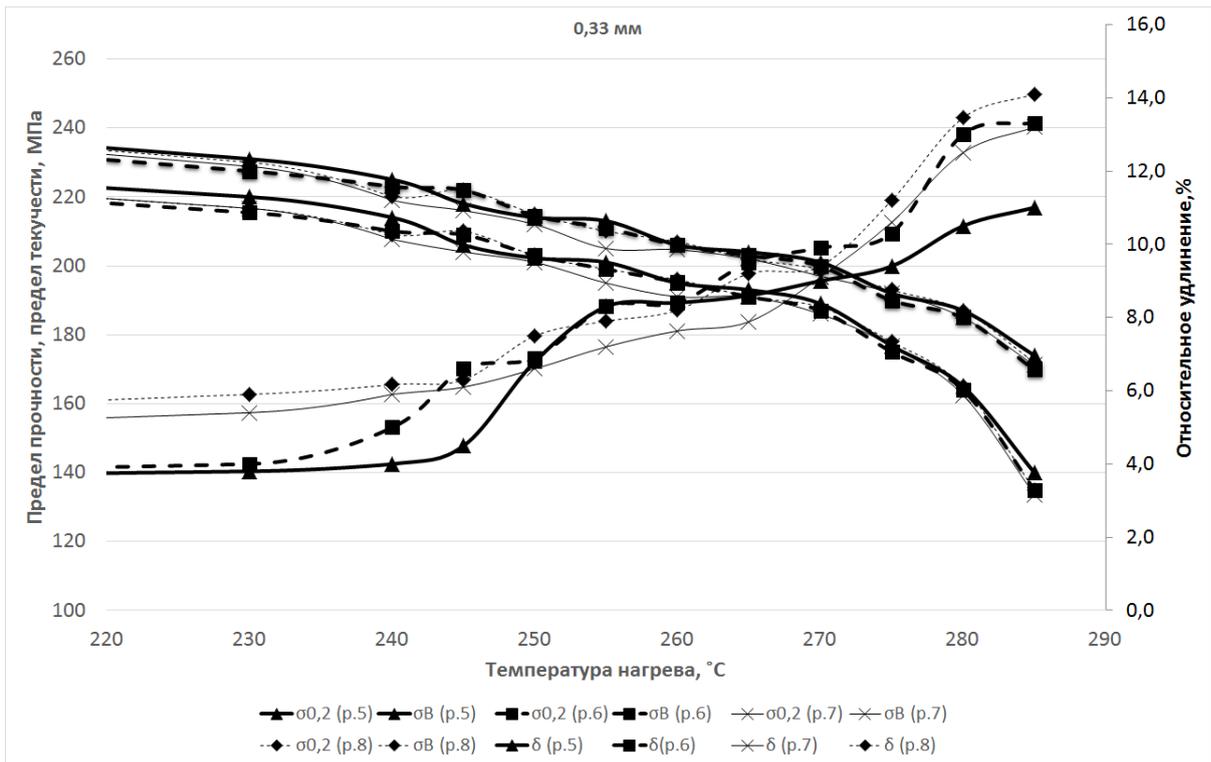


Рисунок 4.10 – Изменение предела прочности, предела текучести и относительного удлинения ленты толщиной 0,33 мм

В среднем диапазоне температур отжига относительное удлинение полос из сплава с повышенным содержанием магния показало пониженные значения. 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 и содержания магния и марганца. Такие зависимости механических свойств наблюдаются и для толщины 0,25 мм и для толщины 0,33 мм.

Сравнение зависимостей, представленных на рисунках 3.9 и 3.10, показывает влияние толщины проката на характер разупрочнения и повышение пластичности при отжиге. Так, относительное удлинение образцов толщиной 0,25 мм повышается равномерно во всем интервале температур отжига. Для образцов толщиной 0,33 мм с повышенным содержанием магния и марганца значительный рост относительного удлинения наблюдается после отжига в интервале температур 245...260°С на ЛНТО. При отжиге в садочных печах повышение пластичности наблюдается при меньших температурах (240–250°С) и затем значительный рост

относительного удлинения наблюдается в образцах толщиной 0,33 мм при температурах отжига 270–280°C.

Усредненные механические свойства и рельеф изгиба при $\perp 180^\circ$ 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 4.11.

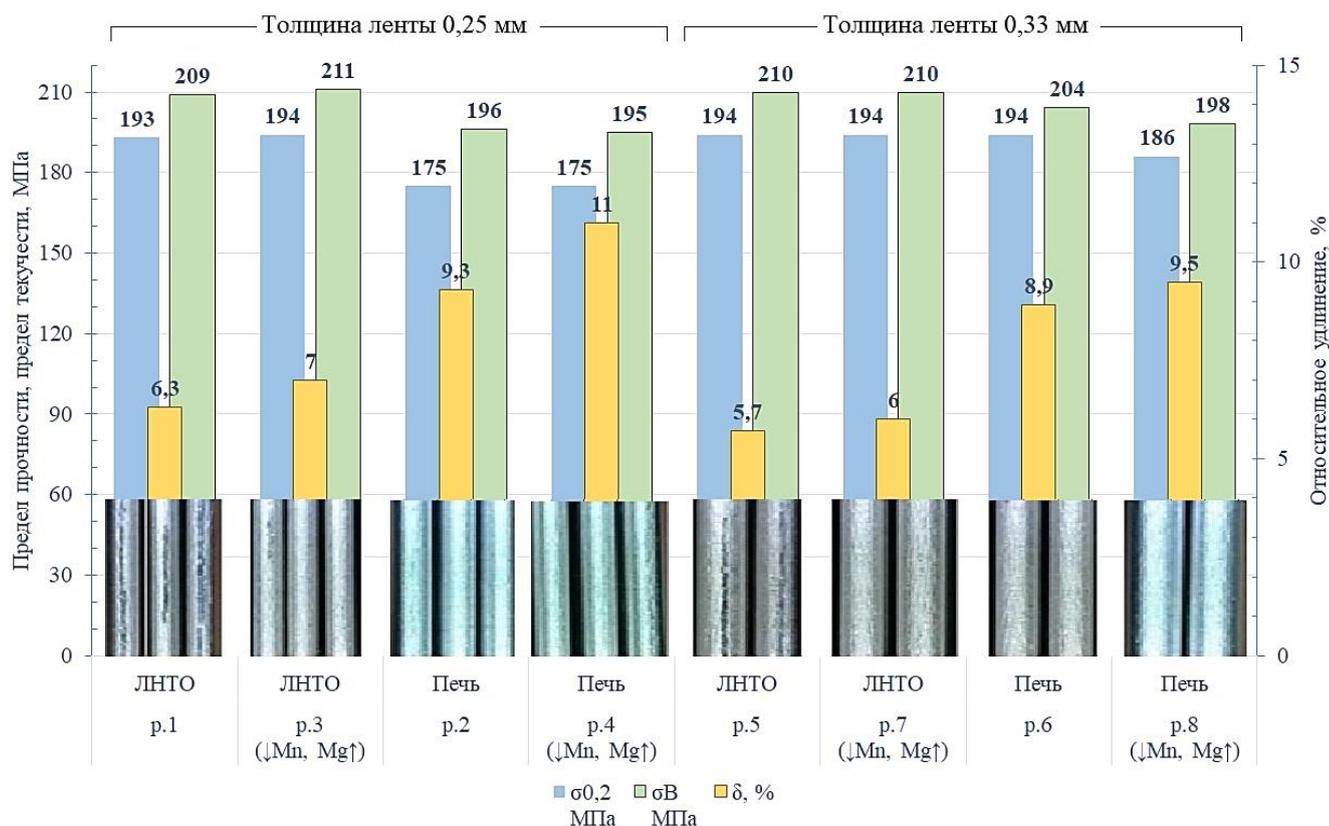


Рисунок 4.11 – Влияние магния и марганца на механические свойства ленты из сплава 3005 толщиной 0,25 и 0,33 мм

Проведение отжига ленты обеих толщин 0,25 и 0,33 мм 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. Корректировка состава, связанная с уменьшением содержания марганца и повышением содержания магния позволяет исключить появление

боковых трещин в месте изгиба за счёт повышения на 0,3...1,7% относительного удлинения.

Для рулонов, отожженных в садочных печах, прочностные и пластические характеристики полученного металла отличаются от средних значений для сплава 3005 для данной позиции:

- 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.

4.4 Влияние термической и деформационной обработки на изменение зёрненной структуры сплавов 3005, 5182, А5

Исследование влияния начального состояния сплавов на их способность к холодной деформации начиналось с проведения холодной прокатки листовых заготовок толщиной 3,5 мм. Заготовки были отожжены и подвергнуты суммарной степени обжата 84,7, 88,5 и 92,9%. После этого изучалась микроструктура боковой поверхности для выявления изменений в геометрии зерен, в зависимости от степени деформации. Полученные данные позволили определить, какую часть общей деформации принимает на себя каждое зерно.

В процессе холодной прокатки образцы металла всех толщин подвергаются значительной деформации, при которой зерна металла вытягиваются в направлении прокатки. Такая деформация находит свое отражение в структуре металла, что можно увидеть на микроструктурах алюминиевых сплавов, как 3005, 5182 и А5, представленных на рисунках 4.12, 4.13 и 4.14. Эти изображения демонстрируют изменения до и после проведения отжига. Отжиг, проведенный на линии НТО, хоть и способствует началу рекристаллизации, оставляет за собой

следы первоначальной деформированной структуры. В отличие от этого, обработка в садочной печи обеспечивает более завершённый процесс рекристаллизации, что видно на структуре металла, ставшей частично рекристаллизованной после такого отжига.

Таким образом, исследуя изменения в структуре металла после различных видов обработки, можно заметить, что метод и условия отжига оказывают значительное влияние на степень и характер рекристаллизации. Это подчеркивает важность выбора соответствующего метода обработки для достижения желаемых свойств металла в зависимости от конкретного применения.

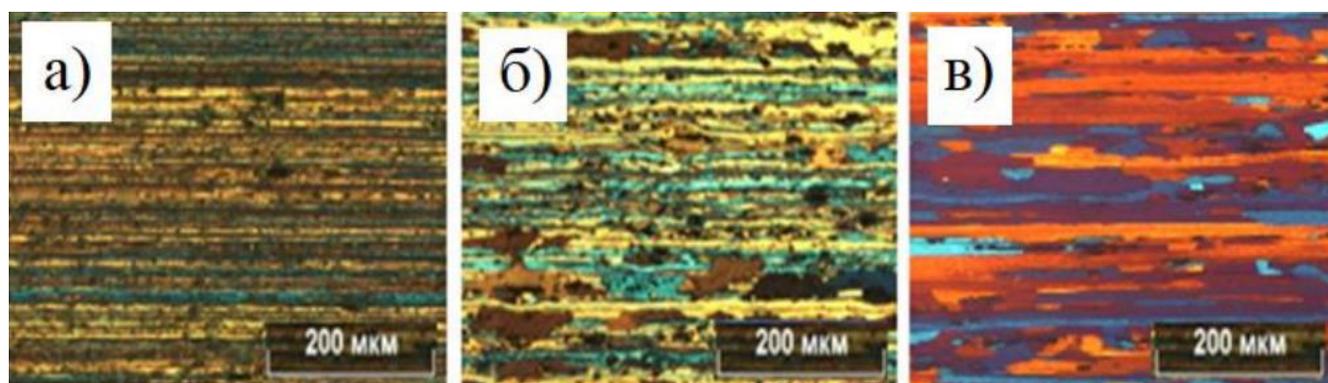


Рисунок 4.12 – Микроструктура сплава 3005 толщиной 0,25 мм после: а – холодной прокатки, б – после отжига на ЛНТО, в – после отжига в садочной печи,
x100



Рисунок 4.13 – Микроструктура сплава 5182 толщиной 0,25 мм после: а – холодной прокатки, б – после отжига на ЛНТО, в – после отжига в садочной печи,
x100

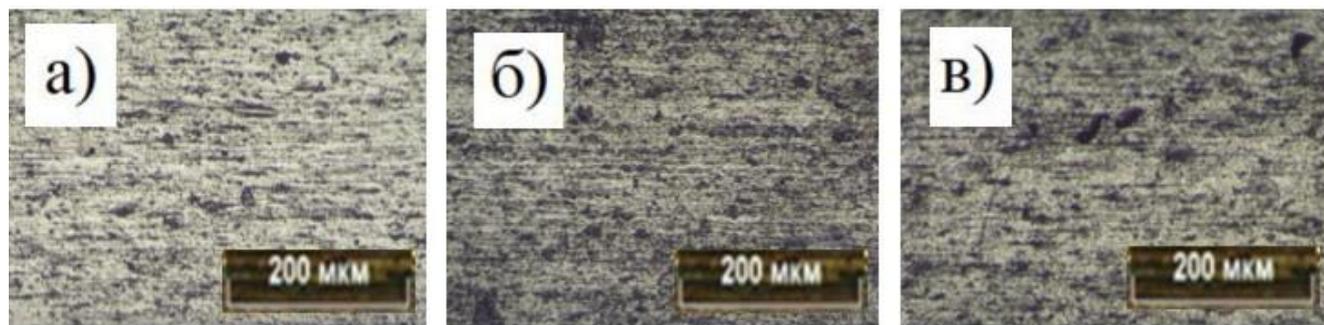


Рисунок 4.14 – Микроструктура сплава А5 толщиной 0,25 мм после: а – холодной прокатки, б – после отжига на ЛНТО, в – после отжига в садочной печи, x100

Основываясь на проведенном анализе микроструктур технического алюминия и сплавов 3005 и 5182, можно сделать вывод о том, что увеличение степени деформации оказывает влияние на форму зерен материала, приводя к их вытянутости в направлении процесса прокатки. Этот феномен является результатом сложных физико-химических процессов, происходящих на микроуровне структуры металла. Интересно, что исследования также указывают на то, что изменения в микроструктуре могут существенно влиять на механические свойства алюминиевых сплавов, делая их более подходящими для определенных технических задач. По формуле (4.1) рассчитана степень деформации зерен.

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

где $\Delta l = l_k - l_0$ – изменение размера зерна после деформации, мкм;

l_k – размер зерна образца после деформации, мкм;

l_0 – размер зерна исходного образца, мкм.

Результаты замеров зёрен в продольном направлении в зависимости от степени деформации для микрошлифов представлены на рисунке 4.15, изменение степени деформации зерен в зависимости от степени деформации на рисунке 4.16.

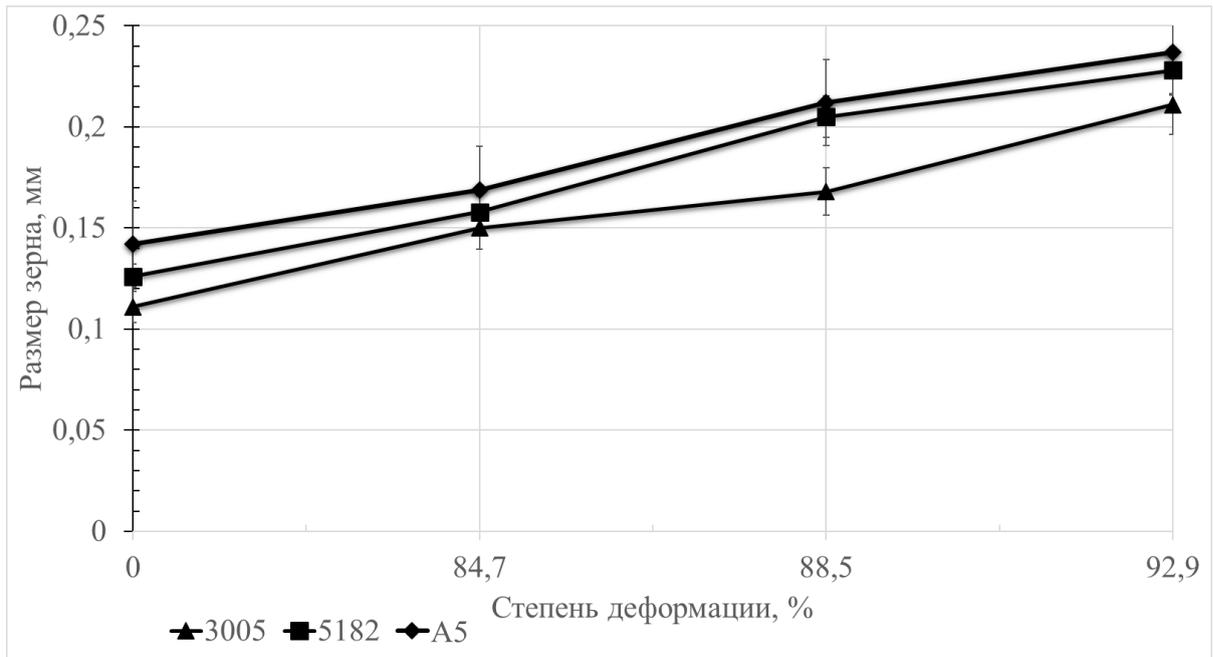


Рисунок 4.15 – Изменение размера зерна в продольном направлении в зависимости от степени деформации в сплавах 3005, 5182, A5

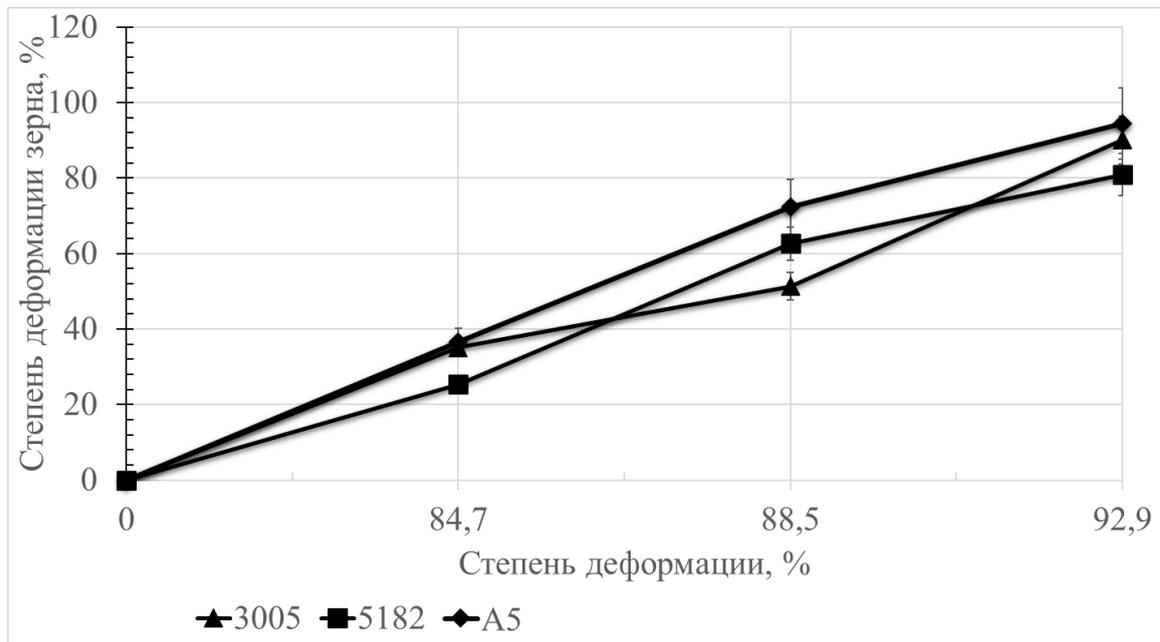


Рисунок 4.16 – Изменение деформации зерна в зависимости от степени деформации в сплавах 3005, 5182, A5

Изучение металлургических свойств сплавов 3005 и 5182 позволяет глубже понять процессы, происходящие в материале под влиянием деформации. Особенно

интересны изменения, происходящие в структуре зерен при увеличении степени деформации. Из анализа, представленного на рисунке 4.15, становится очевидным, что при переходе от 84% до 93% степени деформации зерна в продольном направлении удлиняются почти в два раза, достигая увеличения в 1,8...1,9 раза.

Дополнительное исследование, представленное на рисунке 4.16, подтверждает, что такое удлинение зерен в продольном направлении значительно превышает деформацию зерна в поперечном сечении образца. Это указывает на то, что энергия, приложенная к сплаву, в основном тратится на изменение формы зерен, а не на их перемещение относительно друг друга, что снижает вероятность проскальзывания по границам зерен.

Анализ микроструктур листов толщиной до 2,0 мм из алюминиевых сплавов 3005, 5182 и А5 позволил рассчитать размер зерен, которые представлены на рисунках 4.17, 4.18 и 4.19.

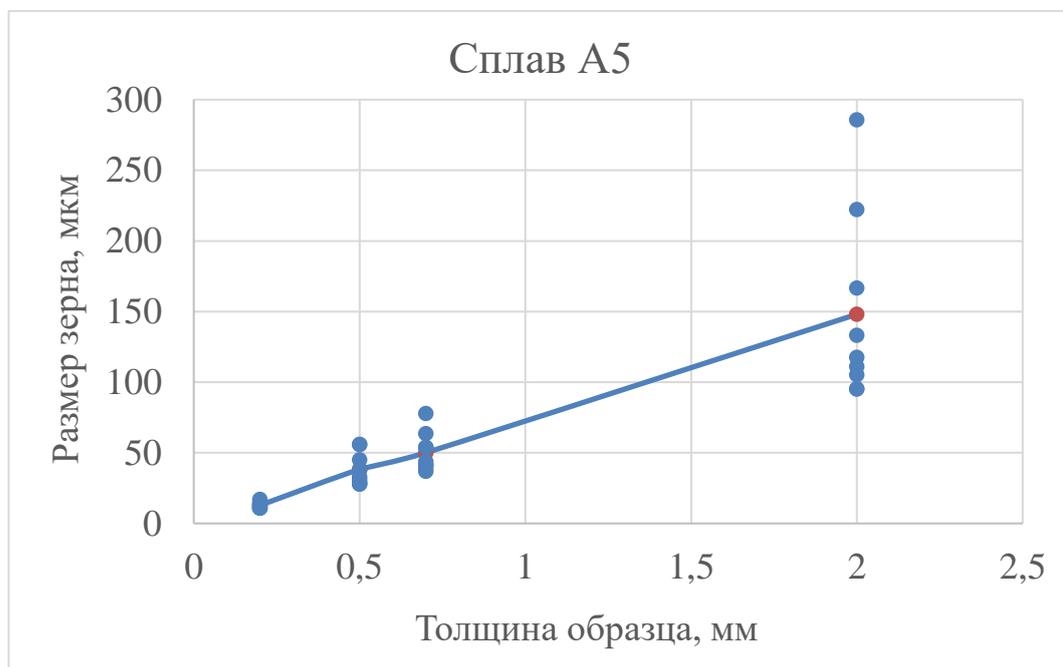


Рисунок 4.17 – Зависимость размера зерна от толщины сплава А5

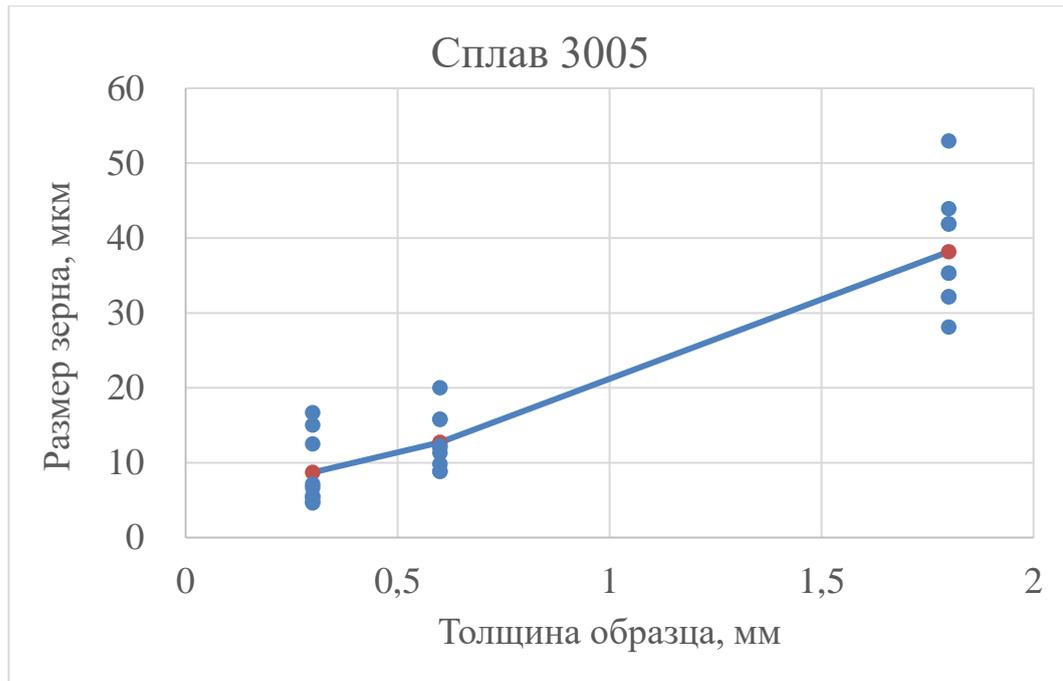


Рисунок 4.18 – Зависимость размера зерна от толщины сплава 3005

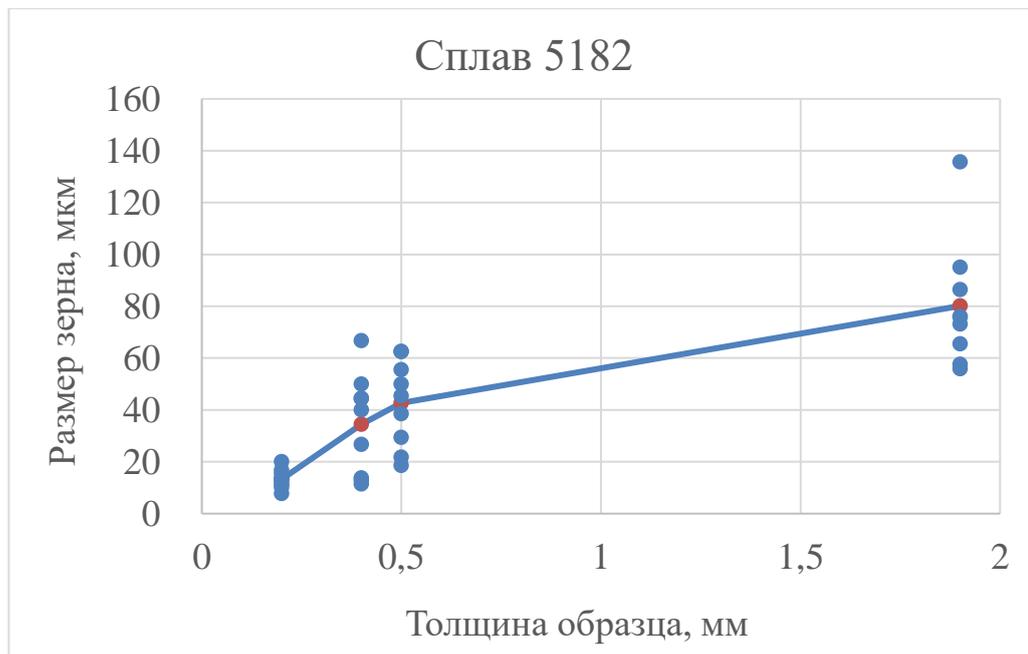


Рисунок 4.19 – Зависимость размера зерна от толщины сплава 5182

Из рисунков 4.17, 4.18, 4.19 видно, что с уменьшением толщины листов от 1,7...2 мм до 0,2...0,25 мм размер зёрен уменьшается в зависимости от марки сплава от 100...300 мкм в сплаве А5, 58...140 мкм в сплаве 5182, 29...52 мкм в сплаве 3005 до 3..18 мкм для всех сплавов, при этом снижается разнотернистость, что хорошо видно по разбросу экспериментальных точек на графиках.

4.5 Выводы по главе 4

Для рулонов, отожженных в садочных печах, прочностные и пластические характеристики полученного металла отличаются от средних значений для отожженного 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%.

Проведение отжига на линии непрерывной термообработки 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.

С повышением температуры отжига от 220 до 285 °С в обоих видах нагревательных устройств предел прочности и предел текучести снижаются в среднем на 20...25%, а относительное удлинение повышается в 2,5...2,8 раза для всех толщин холодного проката. Повышенное содержание магния на 0,05 масс% и пониженное содержание марганца на 0,05 масс% относительно средних значений приводит к получению в среднем на 2% пониженных средних значений относительного удлинения для всех температур отжига в интервале 220...285°С.

В среднем диапазоне температур отжига 240...270°С относительное удлинение полос из сплава с повышенным содержанием магния показало пониженные значения. 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 и содержания магния и марганца.

Проведение отжига ленты обеих толщин 0,25 и 0,33 мм 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. Корректировка состава, связанная с уменьшением содержания марганца и повышением содержания магния позволяет исключить появление боковых трещин в месте изгиба за счёт повышения на 0,3...1,7% относительного удлинения.

Структура металла для образцов всех толщин после холодной прокатки деформированная, зёрна вытянуты вдоль направления прокатки. После отжига на ЛНТО сохраняется деформированная структура, но уже с начальной стадией рекристаллизации. Структура металла, отожженного в садочной печи, частично рекристаллизованная.

С уменьшением толщины листов от 1,7...2 мм до 0,2...0,25 мм размер зёрен уменьшается в зависимости от марки сплава от 100...300 мкм в сплаве А5, 58...140 мкм в сплаве 5182, 29...52 мкм в сплаве 3005 до 3..18 мкм для всех сплавов, при этом снижается разнотернистость, что хорошо видно по разбросу экспериментальных точек на графиках.

5 Влияние структуры и условий деформационной и термической обработок на технологические свойства алюминиевых сплавов А5, 3005, 5182

5.1 Влияние термической обработки на технологические свойства сплавов А5, 3005, 5182

В ходе исследований, целью которых было определить максимально возможные параметры глубокой вытяжки для сплавов А5, 3005 и 5182, были проведены обширные испытания. Результаты этих испытаний были тщательно анализированы и визуализированы в виде графика, который можно увидеть на рисунке 5.1. Данная визуализация является ключевым элементом для понимания предельных коэффициентов вытяжки каждого из рассматриваемых сплавов.

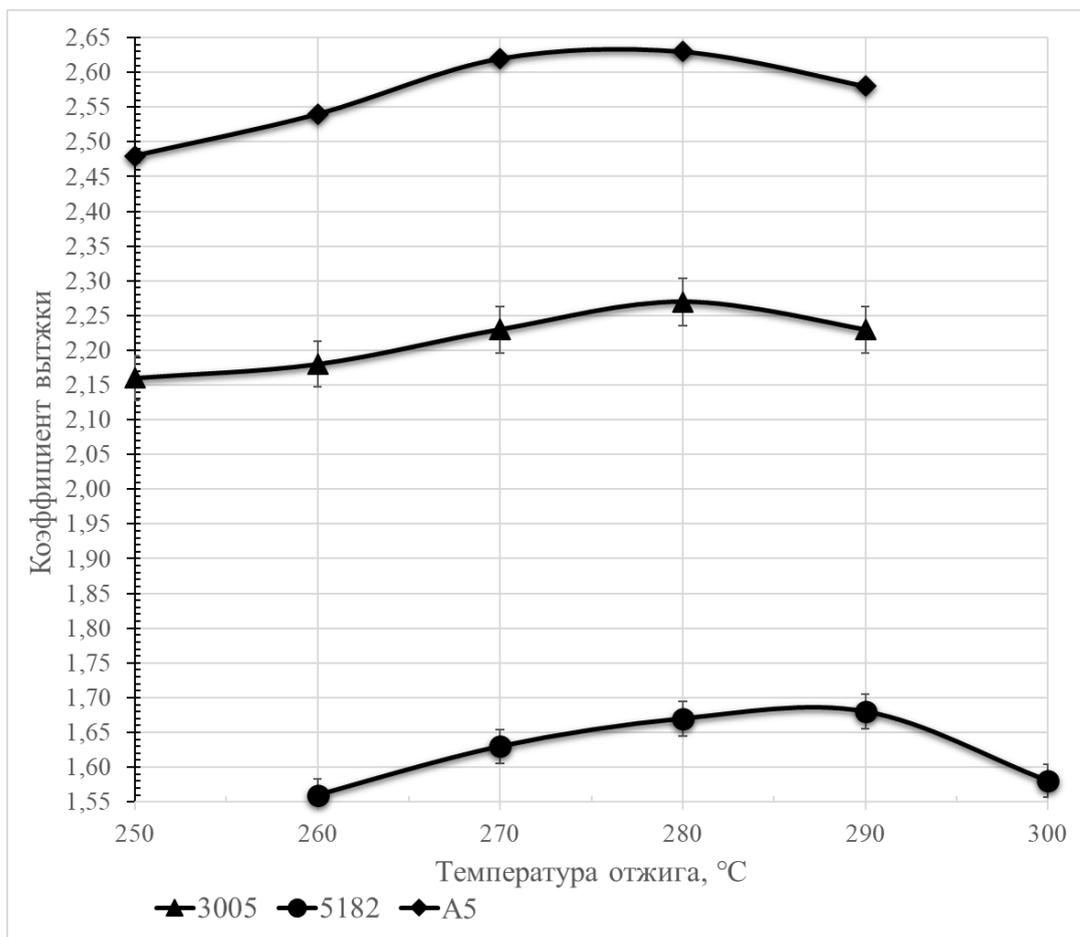


Рисунок 5.1 – Зависимость предельного коэффициента вытяжки от температуры отжига для алюминиевых сплавов 3005, 5182, А5 толщиной 0,25 мм

При увеличении температуры нагрева до 275°C в сплаве 3005 происходит рост предельного коэффициента вытяжки. Это обуславливает повышенную пластичность материала и способствует более эффективной обработке. Важно отметить, что последующее увеличение температуры до 290°C приводит к обратному эффекту, снижая предельный коэффициент вытяжки и уменьшая пластичность сплава. Такие изменения в свойствах материала могут оказать существенное влияние на процесс производства и качество конечной продукции.

В сплаве 5182 отжиг в интервале температур от $T=260^{\circ}\text{C}$ до $T=290^{\circ}\text{C}$ способствовал росту значения предельного коэффициента вытяжки. Дальнейший нагрев до $T=290^{\circ}\text{C}$ приводил к его падению.

В сплаве А5 отжиг до температуры $T=280^{\circ}\text{C}$ способствовал росту значения предельного коэффициента вытяжки. Дальнейший нагрев до $T=290^{\circ}\text{C}$ приводил к его падению.

Анализируя изменения прочностных и пластических свойств алюминиевых сплавов А5, 3005 и 5182, можно сделать вывод, наличие 1,15...1,2% марганца и присутствие в количестве около 0,5% Si, Fe, Mg, Cr каждого в сплаве 3005 по сравнению с технически чистым алюминием А5 приводит к снижению на 0,3...0,4 единицы предельного коэффициента вытяжки, что соответствует среднему понижению штампуемости на 12%. При достижении максимальных значений предельного коэффициента вытяжки температурный интервал отжига остается стабильным, что позитивно сказывается на процессе. Исследования показали, что данное явление имеет прямую зависимость от времени выдержки и скорости нагрева.

Повышение содержание магния в сплаве 5182 до 4,5% приводит к снижению предельного коэффициента вытяжки на единицу, что соответствует падению штампуемости на 40%, при этом интервал температуры отжига, позволяющий достичь максимальной штампуемости в сплаве 5182, повышается по сравнению с А5 и 3005 от 275 до 290°C.

Повышение содержания магния на 0,05 масс% относительно средних значений в сплаве 3005 снижает температуру рекристаллизации, так как в границах

зёрен начинается выделение частиц второй фазы. Однако в процессе роста частицы второй фазы достигают размеров, при которых происходит стабилизация на них границ зёрен, что приводит к росту температуры рекристаллизации. Кроме того, это приводит к измельчению зерна, в том числе за счёт активации механизма образования зародышей, стимулируемого частицами, размер зерна уменьшился с 75 до 25 мкм.

5.2 Влияние кристаллографической текстуры на способность листов из алюминиевого сплава 3005 к гибочным операциям

На рисунках 5.2-5.5 приведено изменение прямых полюсных фигур для исследуемого сплава 3005 толщиной 0,25 мм, 0,46 мм, 0,82 мм в холоднокатанном и отожженном состояниях.

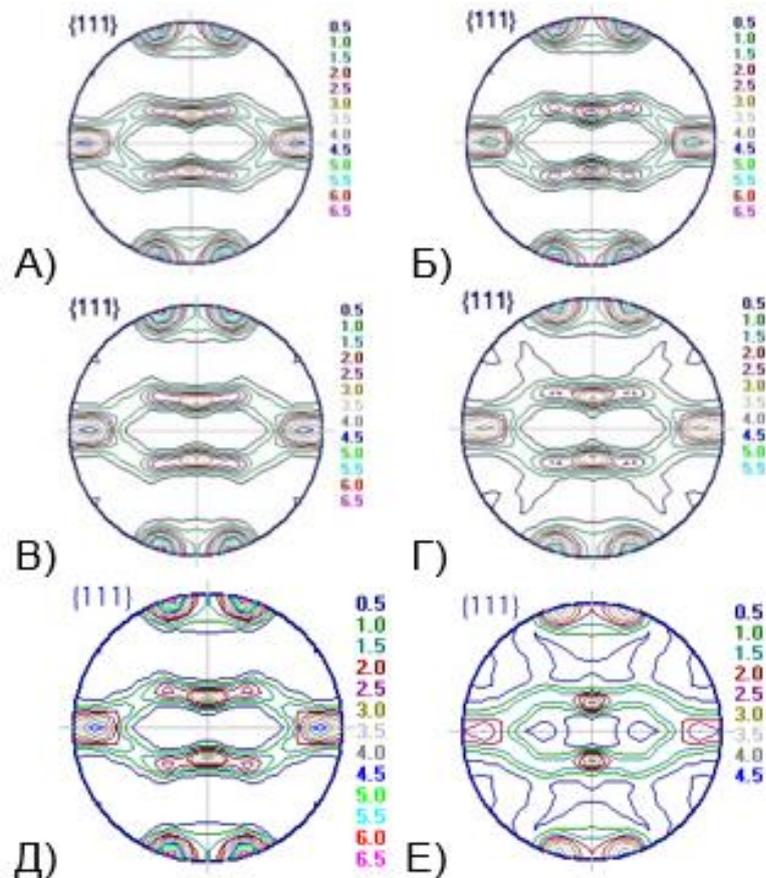


Рисунок 5.2 – Изменение прямых полюсных фигур ориентировкой $\{111\}$:

А) 0,82мм, Б) 0,82мм+отжиг, В) 0,46мм, Г) 0,46мм+отжиг, Д) 0,25мм,
Е) 0,25мм+отжиг

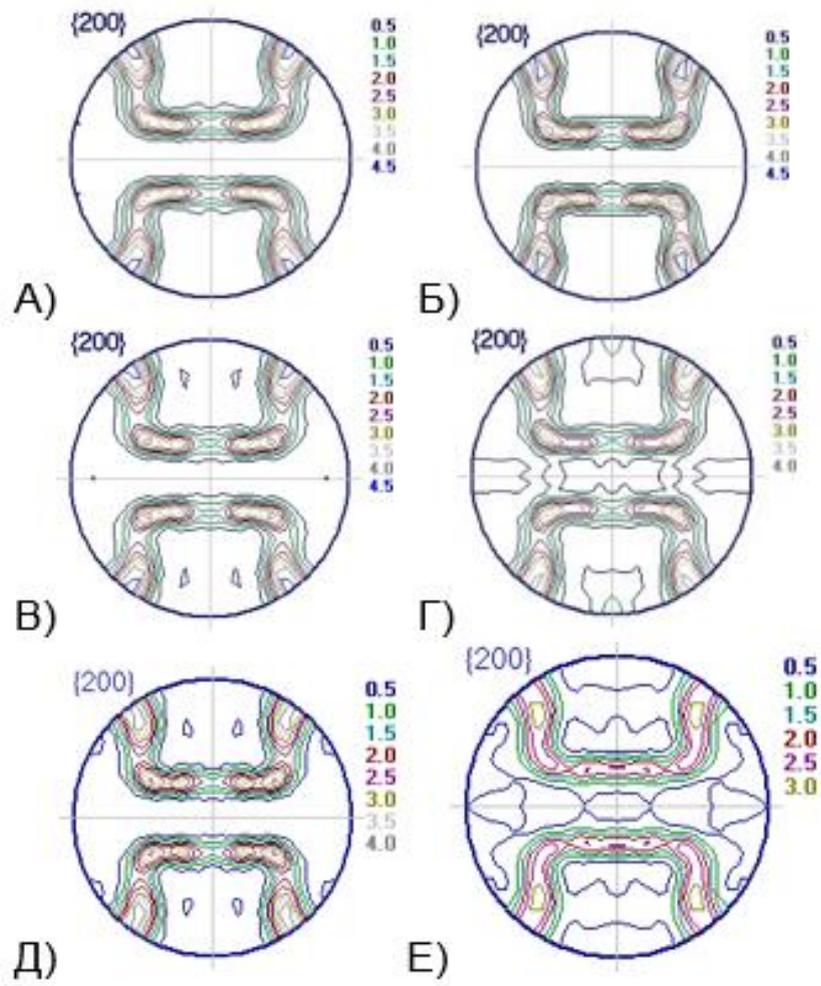


Рисунок 5.3 – Изменение прямых полюсных фигур {200}: А) 0,82мм, Б) 0,82мм+отжиг, В) 0,46мм, Г) 0,46мм+отжиг, Д) 0,25мм, Е) 0,25мм+отжиг

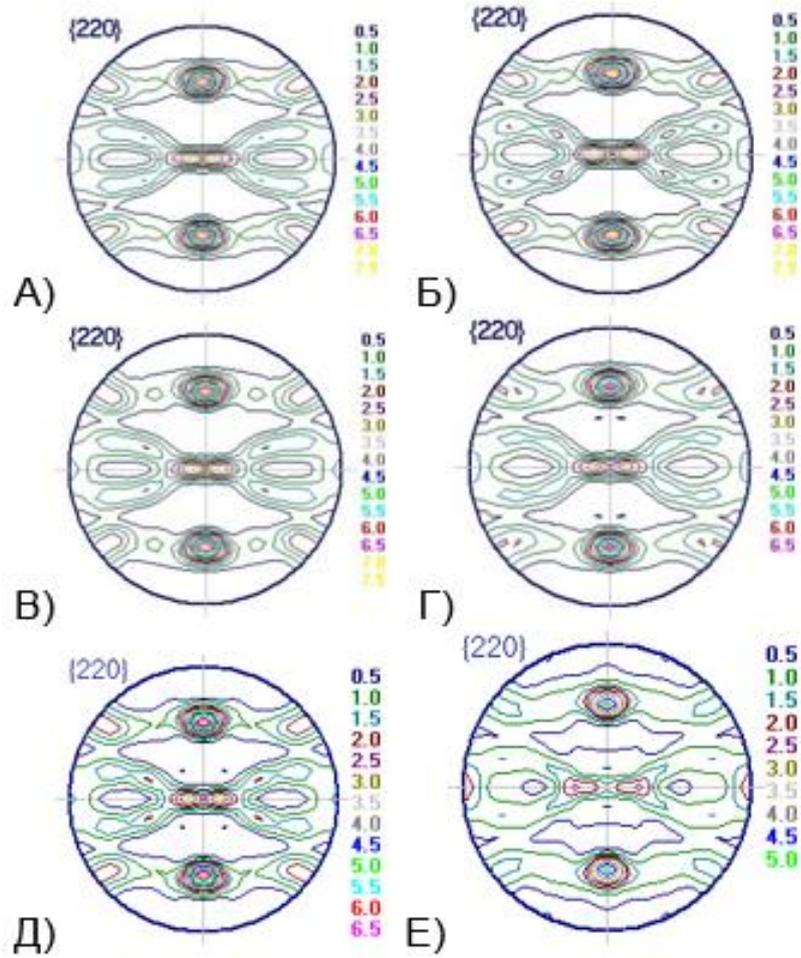


Рисунок 5.4 – Изменение прямых полюсных фигур ориентировкой $\{220\}$

А) 0,82мм, Б) 0,82мм+отжиг, В) 0,46мм, Г) 0,46мм+отжиг, Д) 0,25мм,

Е) 0,25мм+отжиг

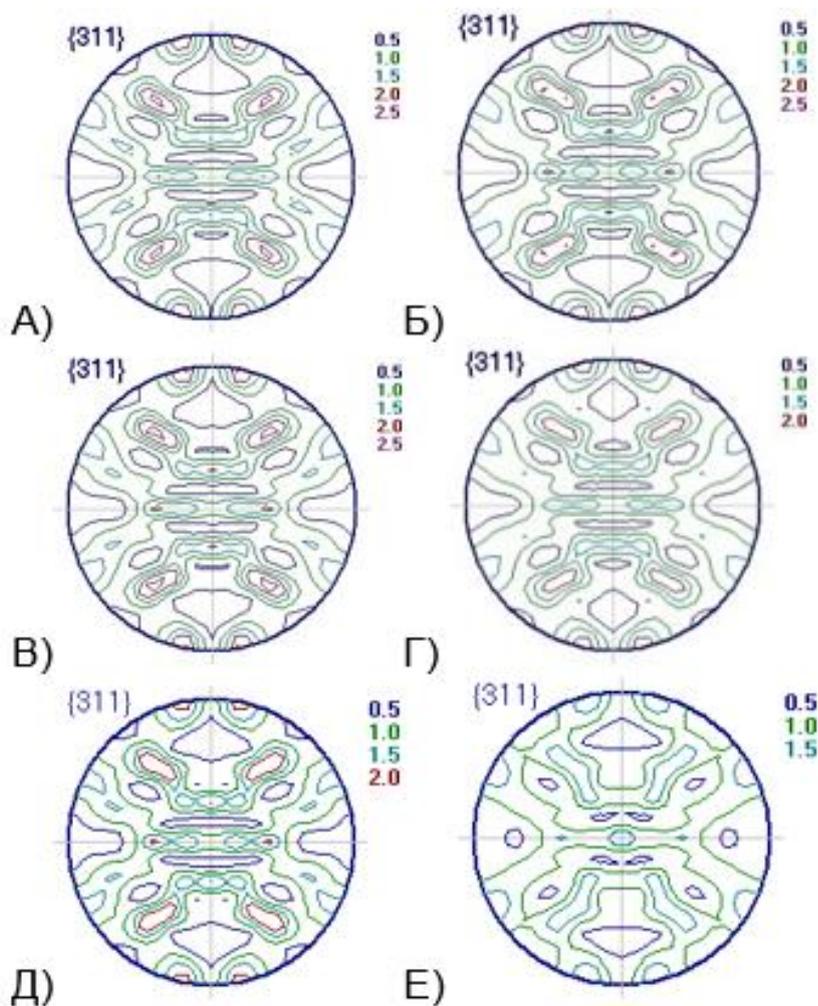


Рисунок 5.5 – Изменение прямых полюсных фигур ориентировкой $\{311\}$

А) 0,82мм, Б) 0,82мм+отжиг, В) 0,46мм, Г) 0,46мм+отжиг, Д) 0,25мм,
Е) 0,25мм+отжиг

На рисунке 5.6 приведены изменение текстуры с помощью обратных полюсных фигур по направлению проката для исследуемого сплава 3005 толщиной 0,25 мм, 0,46 мм, 0,82 мм в холоднокатанном и отожженном состояниях.

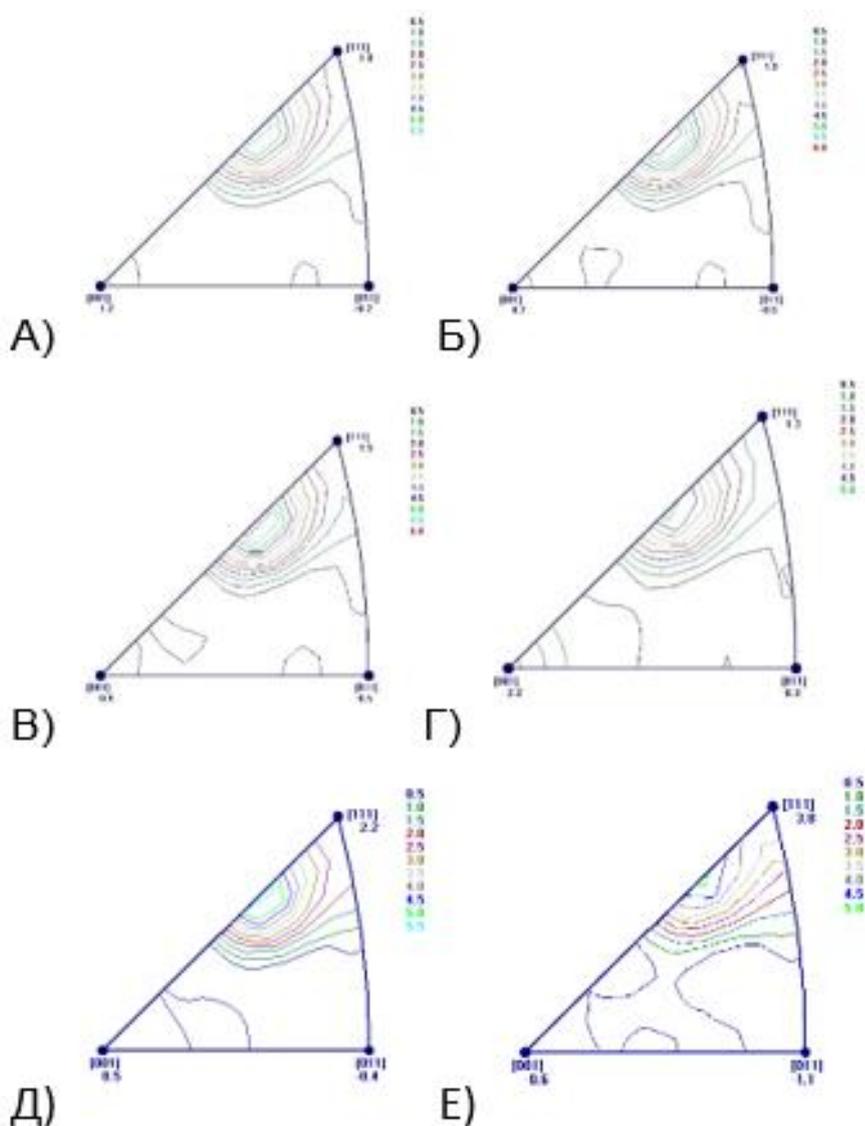


Рисунок 5.6 – Изменение обратных полюсных фигур

А) 0,82мм, Б) 0,82мм+отжиг, В) 0,46мм, Г) 0,46мм+отжиг, Д) 0,25мм,
Е) 0,25мм+отжиг

Из рисунков 5.2-5.6 видно, что уменьшение толщины от 0,82 до 0,25 мм в листах из сплава 3005 не приводит к ярко выраженным изменениям в текстурных картинах, однако очевидно различие в характере текстуры между нагартованным и отожжённым состоянием листов по мере увеличения обжатия и получения более тонких листов.

Для более наглядного количественного анализа результаты рентгеноструктурного анализа сплава 3005 представлены на рисунке 5.7 в виде круговых диаграмм в виде основных ориентировок и их объемных долей для образцов из сплава 3005 толщиной 0,25мм, 0,46мм и 0,82мм после холодной прокатки (а) и отжига (б). Такая интерпретация позволяет выявить, что в холоднокатаном состоянии и после отжига на образцах всех исследуемых толщин преобладает бестекстурная составляющая. При этом после отжига объемная доля бестекстурной составляющей вырастает в 2 раза. Остальные ориентировки идут в порядке убывания, для холоднокатаных образцов: $S''^2(341)\langle 4-58 \rangle$, $Va'(493)\langle 5-47 \rangle$, $Vs(110)\langle 1-12 \rangle$, $S''(385)\langle 7-54 \rangle$, $Cu'(113)\langle -6-65 \rangle$, для образцов после отжига: $S''^2(341)\langle 4-58 \rangle$, $Va'(493)\langle 5-47 \rangle$, $Cu''(449)\langle -6-65 \rangle$, $Vs(110)\langle 1-12 \rangle$.

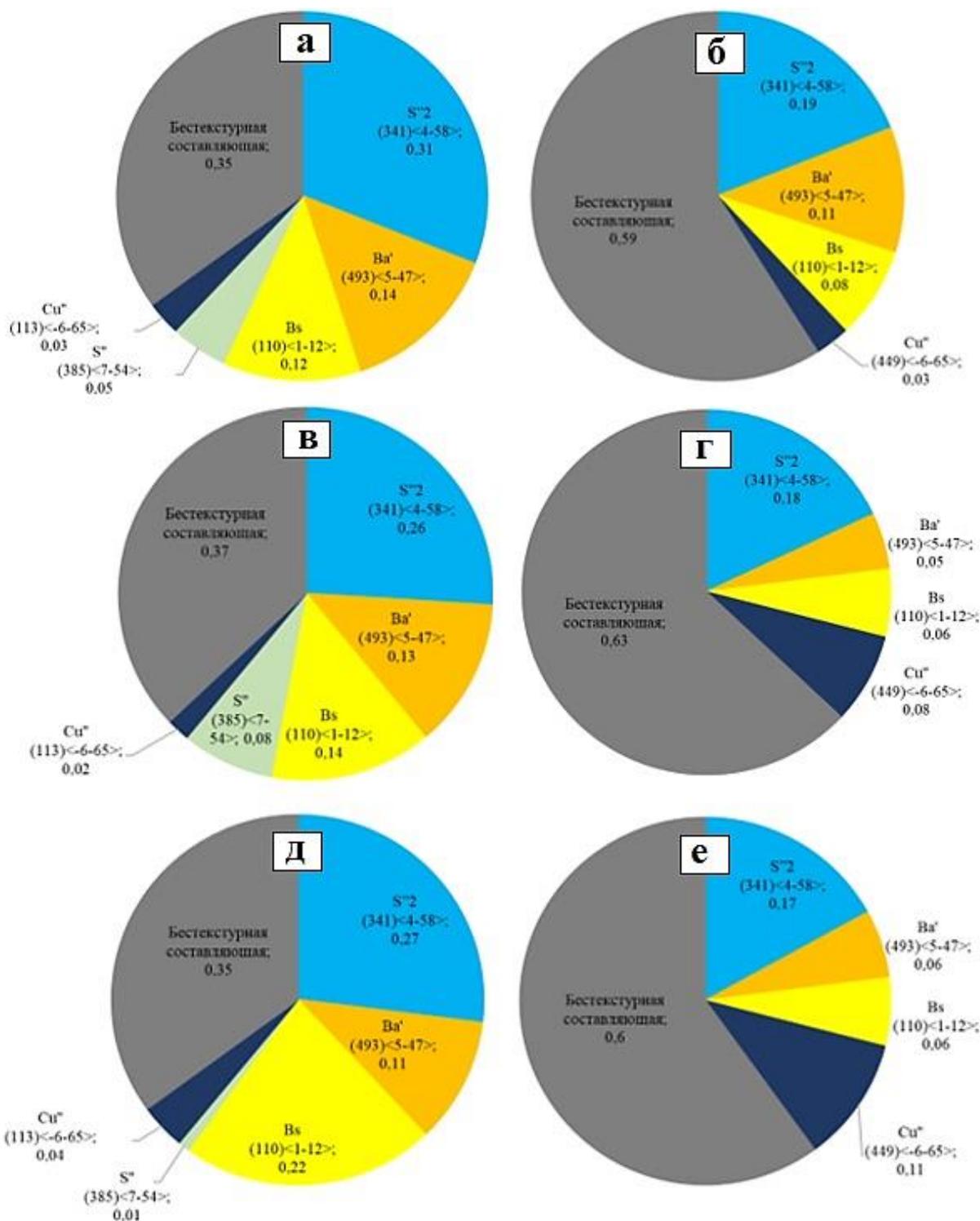


Рисунок 5.7 – Основные ориентировки и их объемные доли образцов из сплава 3005 толщиной 0,25мм (а), 0,46мм (в), 0,82мм (д) после холодной прокатки; 0,25мм (б), 0,46мм (г), 0,82мм (е) после отжига

На рисунке 5.8 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.

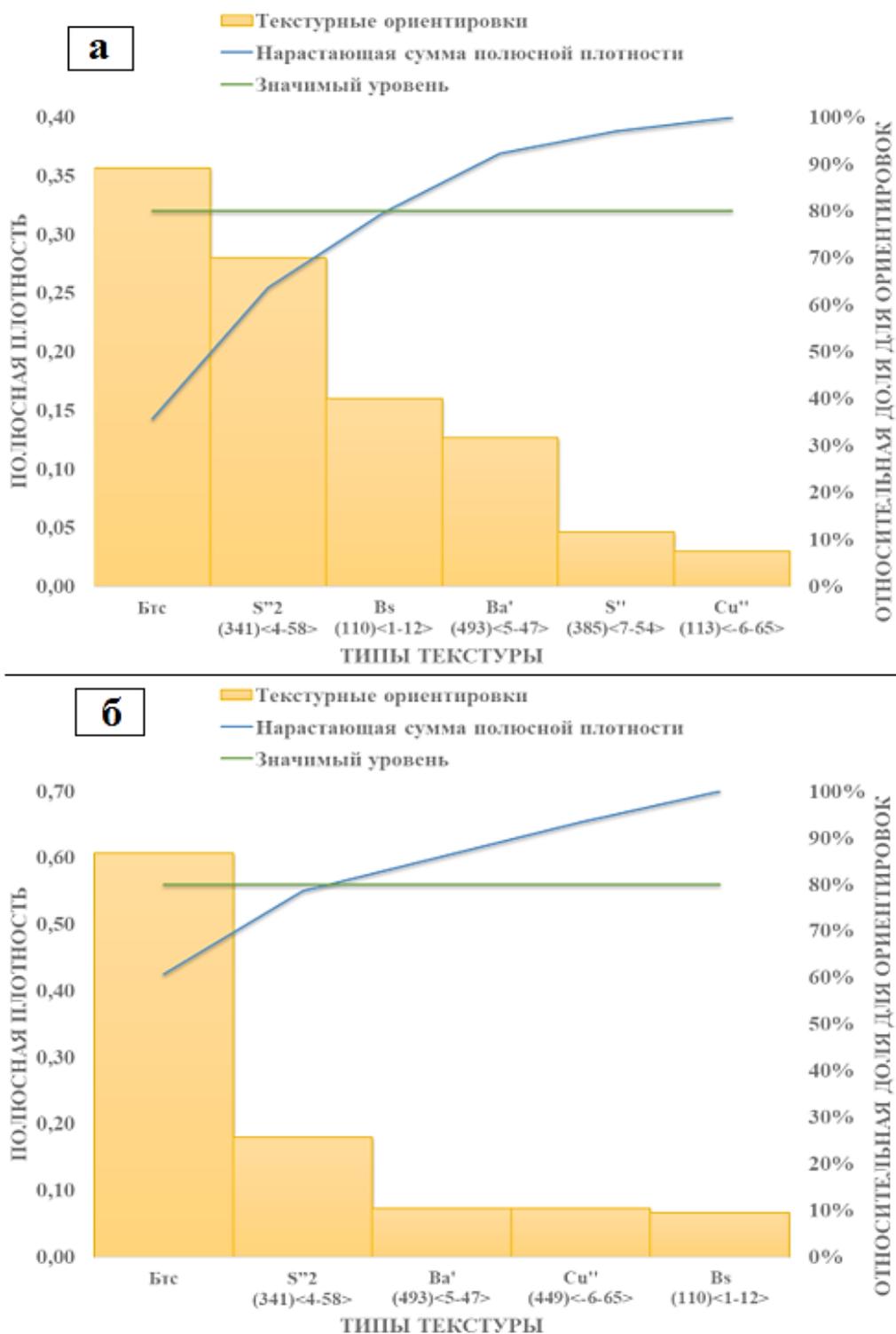


Рисунок 5.8 – Ранжирование основных ориентировок текстуры образцов из сплава 3005 толщиной 0,25мм, 0,46мм и 0,82мм после холодной прокатки (а) и отжига (б)

Из рисунка видно, 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 $Vs'(110)\langle 1-12 \rangle$, а на отоженных образцах ключевую роль, составляющую 80% играют бестекстурная составляющая и ориентировка $S''^2(341)\langle 4-58 \rangle$.

На рисунке 5.9 представлены диаграммы зависимости плотности основных ориентировок текстуры и штампуемости, методика оценки которой приведена в разделе 2.8, от толщины образцов после холодной прокатки и отжига.

На рисунке 5.9а видно, что с уменьшением толщины образцов после холодной прокатки доли бестекстурной составляющей и текстуры $S''^2(341)\langle 4-58 \rangle$ практически не меняются, доля текстуры $Va'(493)\langle 5-47 \rangle$ незначительно уменьшается, а текстур $Vs(110)\langle 1-12 \rangle$ увеличиваются. Снижение почти до нуля доли ориентировки $S''(385)\langle 7-54 \rangle$ и рост объемной доли текстуры $Vs(110)\langle 1-12 \rangle$ при толщине листа 0,25 мм приводит к снижению способности к гибочным операциям в 2,8 раза. На рисунке 4.9б видно, что для образцов после отжига, с уменьшением толщины образцов также практически не меняются доли бестекстурной составляющей и текстуры $S''^2(341)\langle 4-58 \rangle$, доля текстуры $Va'(493)\langle 5-47 \rangle$ уменьшается, а текстур $Su''(449)\langle 6-65 \rangle$ увеличиваются. Стоит отметить, что после отжига полностью пропала доля текстуры $S''(385)\langle 7-54 \rangle$, а доля $Vs(110)\langle 1-12 \rangle$ резко снижается по сравнению с холоднокатаным состоянием на образцах всех толщин. Аналогичные наблюдения выявлены для двух других исследуемых сплавов А5 и 5182.

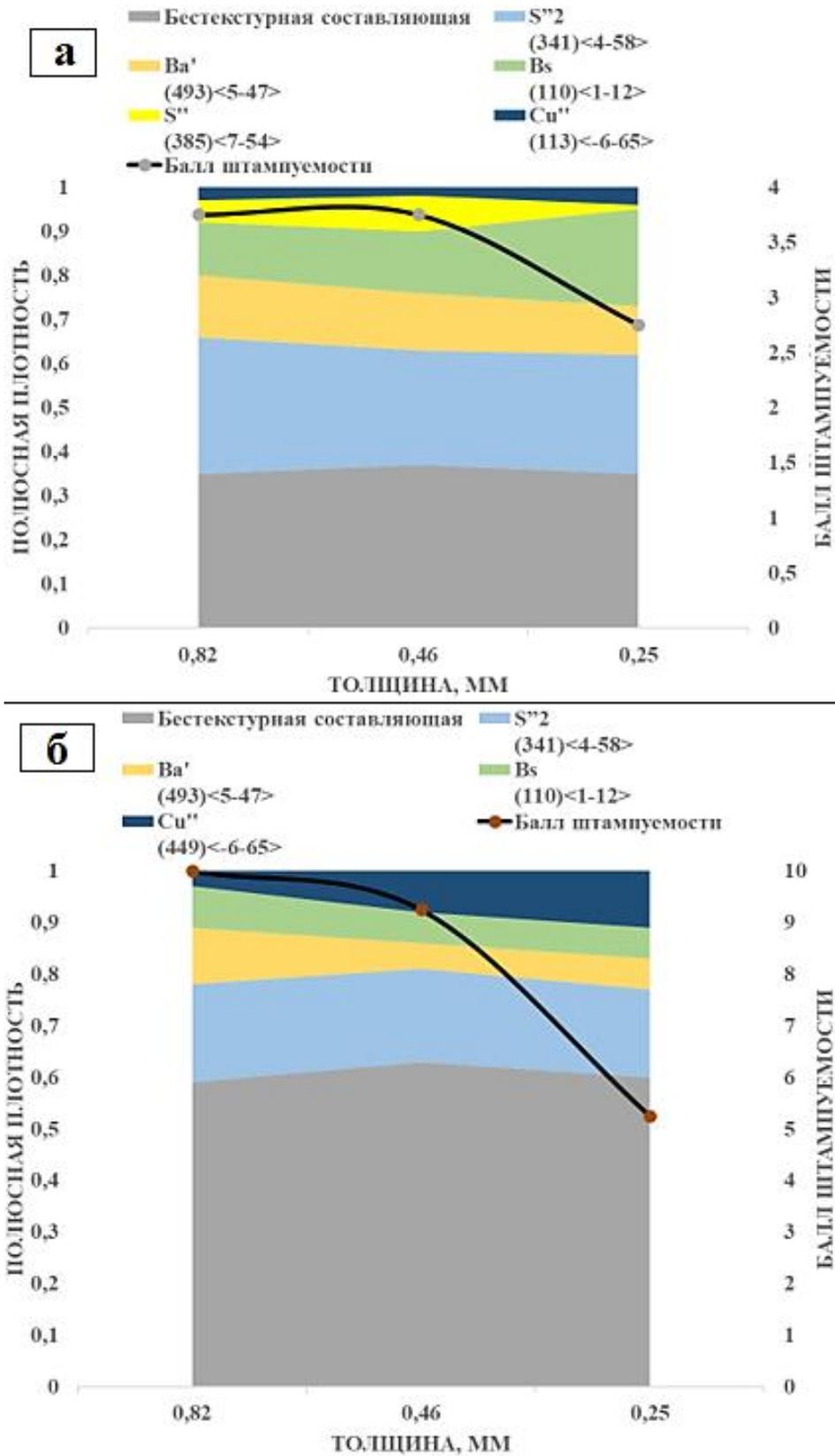


Рисунок 5.9 – Диаграммы зависимости плотности основных ориентировок текстуры и штампуемости от толщины образцов из сплава 3005 после холодной прокатки (а) и отжига (б)

На рисунке 5.10 в виде графика представлены значения баллов штампуемости, рассчитанные по разработанной в разделе 2.8 методике, для образцов из сплава 3005 толщиной 0,25 мм, 0,46мм и 0,82 мм после холодной прокатки и отжига.

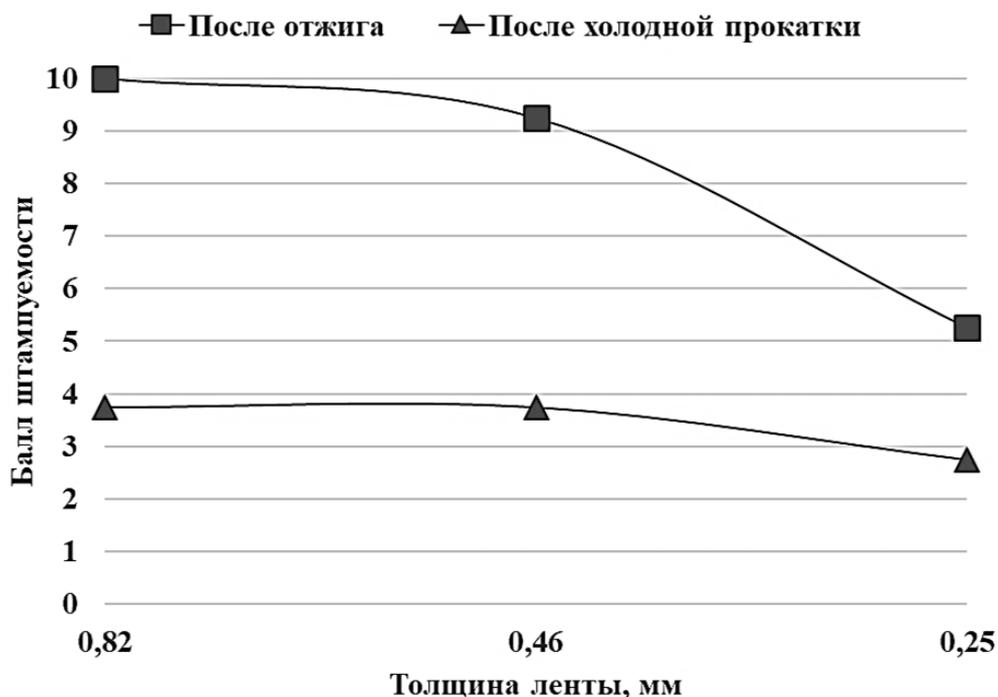


Рисунок 5.10 Баллы штампуемости листов толщиной 0,25мм, 0,46мм и 0,82мм из сплава 3005 после холодной прокатки и отжига

Из рисунка 5.10 видно, что для лент из алюминиевого сплава 3005 толщиной менее 1,0 мм отжиг положительно влияет на пригодность металла к операциям гибки, стоит отметить, что для лент толщиной 0,46 мм и 0,82 мм после отжига штампуемость увеличивается почти в 3 раза, а для толщины 0,25 мм увеличение менее выражено – только в 2 раза.

5.3 Изменение кристаллографической текстуры в тонких образцах из технического алюминия А5 и сплава 5182 в результате отжига

Изменение текстуры листов толщиной 2,5 мм из технического алюминия А5 и сплава 5182 в холодно катанном и отожжённом состоянии представлено в виде прямых полюсных фигур на рисунках 5.11, обратных полюсных фигур – на рисунках 5.12.

Из рисунка 5.11 видно, что отжиг листов из технического алюминия приводит к снижению полюсной плотности плоскостей (111) и (220) при возрастании полюсной плотности плоскостей (220) и (311).

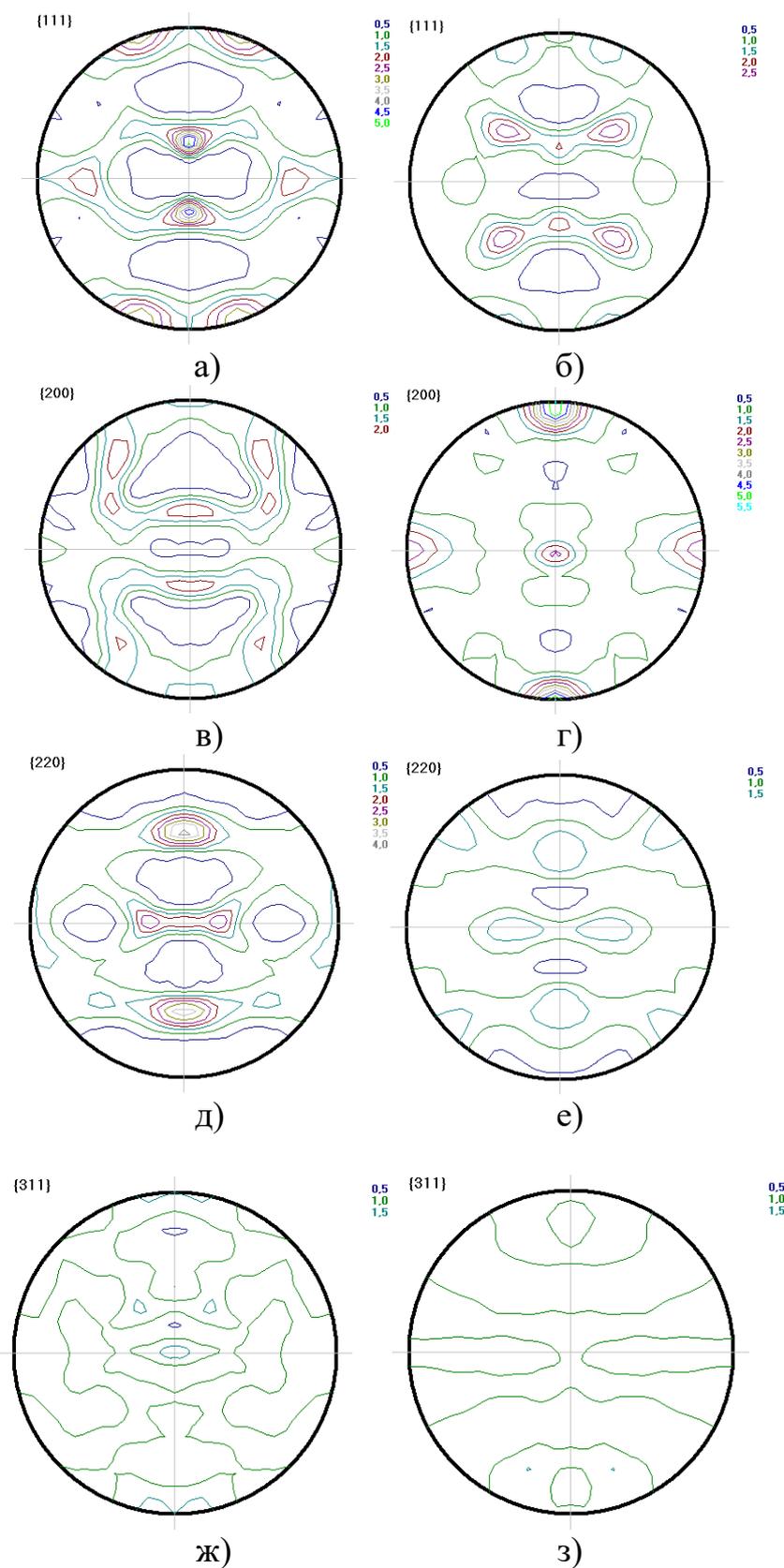


Рисунок 5.11 – Прямые полюсные фигуры технического алюминия А5
толщиной 0,25 мм: а, в, д, ж – после холодной прокатки,
б, г, е, з – после холодной прокатки и отжига

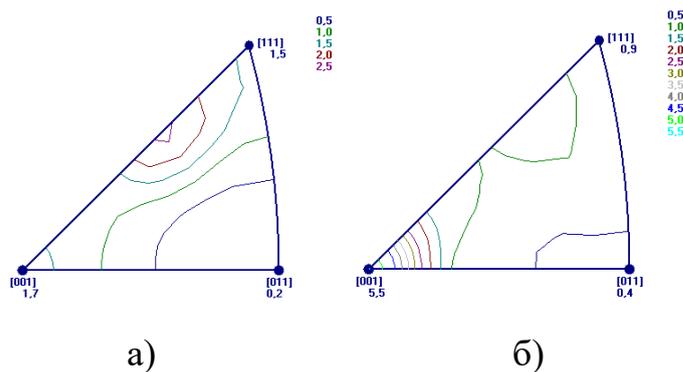


Рисунок 5.12 – Обратные полюсные фигуры технического алюминия А5 толщиной 0,25 мм: а – после прокатки, б- после прокатки и отжига

Отсутствие марганца в техническом алюминии А5 по сравнению со сплавом 3005 приводит к появлению более острой кристаллографической текстуры основных плоскостей, отсутствию бестекстурной составляющей.

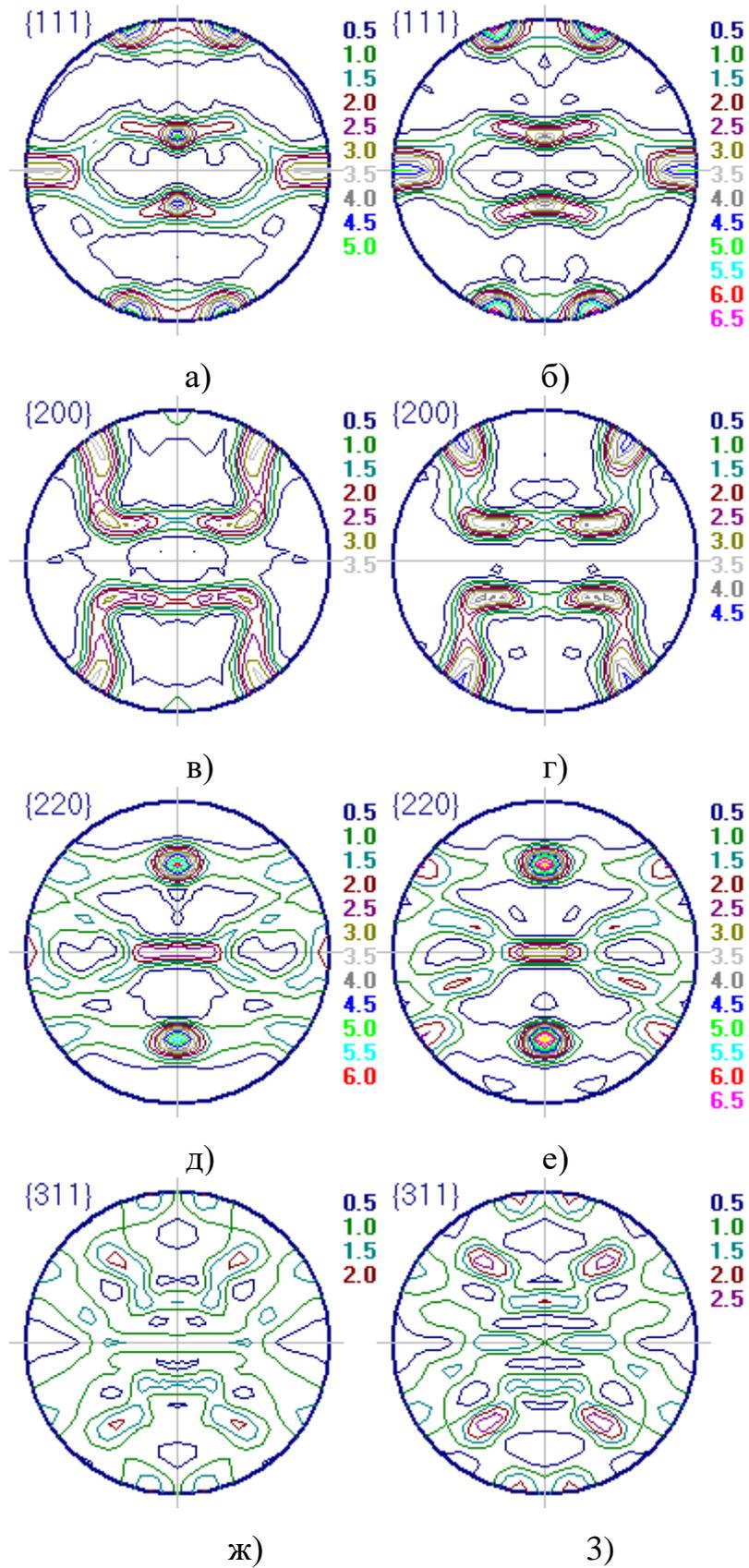


Рисунок 5.13 – Прямые полюсные фигуры листов из сплава 5182 толщиной 0,25 мм: а, в, д, ж – после холодной прокатки, б, г, е, з – после холодной прокатки и отжига

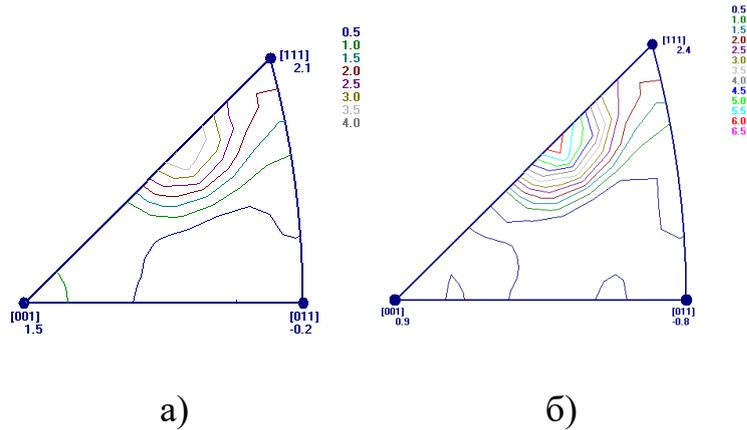


Рисунок 5.14 – Обратные полюсные фигуры листов из сплава 5182 толщиной 0,25 мм: а – после прокатки, б- после прокатки и отжига

Из рисунков 5.13 и 5.14 видно, что в результате отжига листов толщиной 2,5мм из сплава 5182 полюсная плотность основных кристаллографических плоскостей возрастает. Наиболее сильно от 5 до 6,5 это наблюдается для плоскости (111) и от 3,5 до 4,5 – для плоскости (200). Для двух других плоскостей (220) и (311) возрастание полюсной плотности менее заметно. Оценивая влияние магния в количестве около 4,5% по массе в сплаве 5182 и около 1% о массе в сплаве 3005 на кристаллографическую текстуру можно заметить, что магний сдерживает поворот основных кристаллографических плоскостей в результате отжига тонких листов.

5.4 Вычисление минимального радиуса гибки

Для алюминиевого сплава 3005 толщиной 0,25 мм.

$$R_{cp} = 15; t_{cp} = 9.$$

$$x = \frac{9 \cdot 100}{0,25} = 3600;$$

$$r = \frac{15}{3600} = 0,004 \text{ мм.}$$

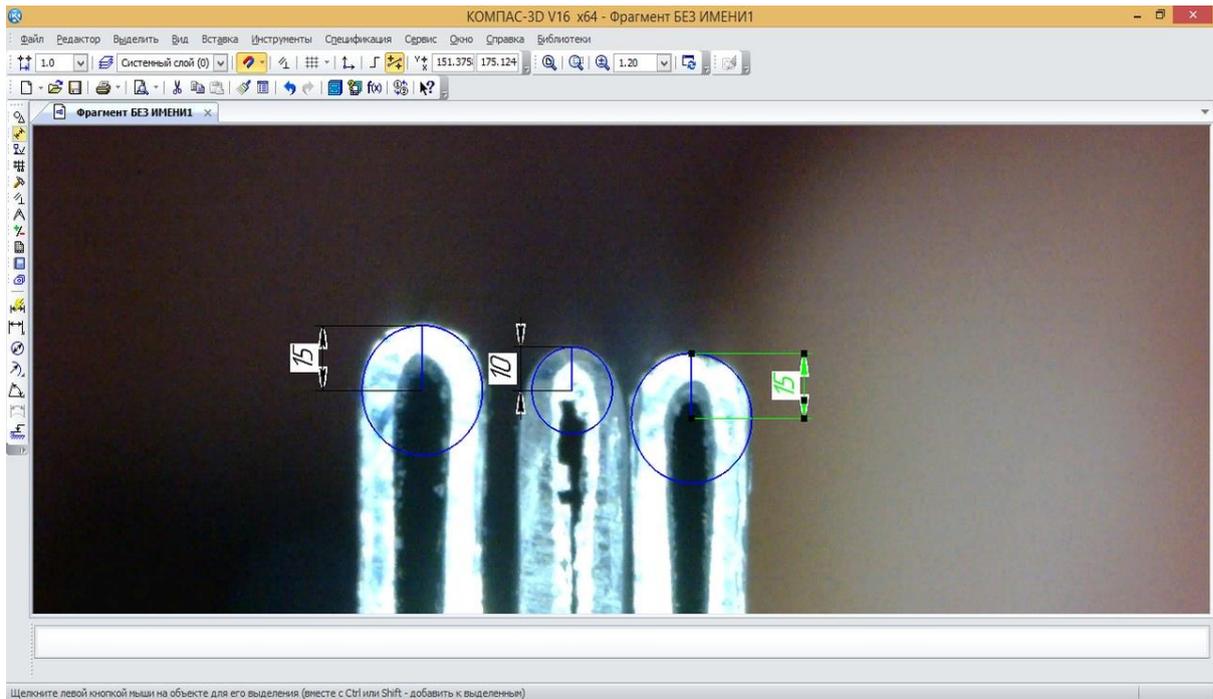


Рисунок 5.15 Определение среднего значения радиуса изгиба для листов толщиной 0,25мм из сплава 3005

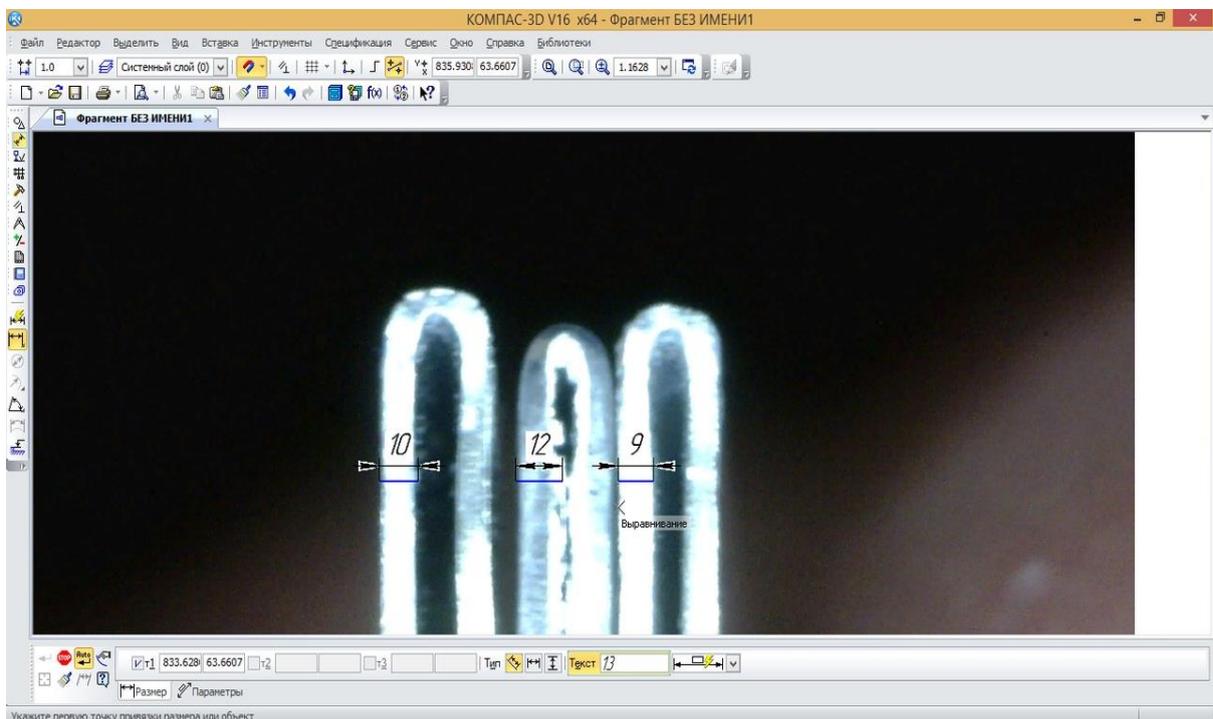


Рисунок 5.16 Определение среднего значения толщины образцов для листов толщиной 0,25мм из сплава 3005

Для образцов толщиной 0,3 мм.

$$R_{cp}=15; t_{cp}=12.$$

$$X=\frac{12 \cdot 100}{0,3} = 4000;$$

$$r=\frac{13}{4000} = 0,003 \text{ мм.}$$

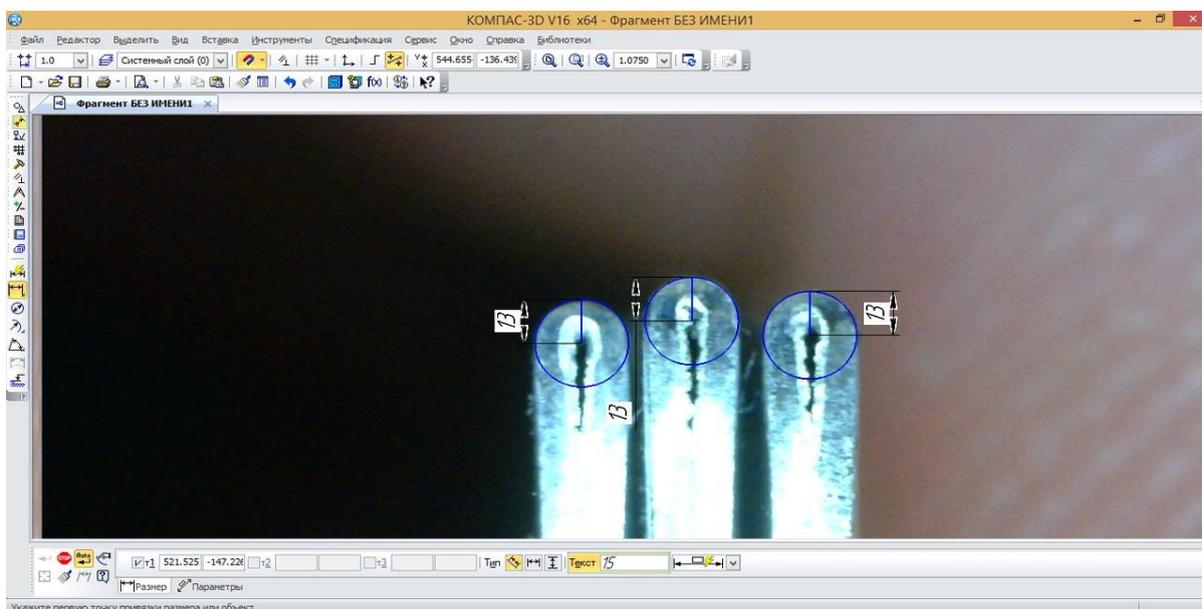


Рисунок 5.17 Определение среднего значения радиуса изгиба для листов толщиной 0,3мм из сплава 3005

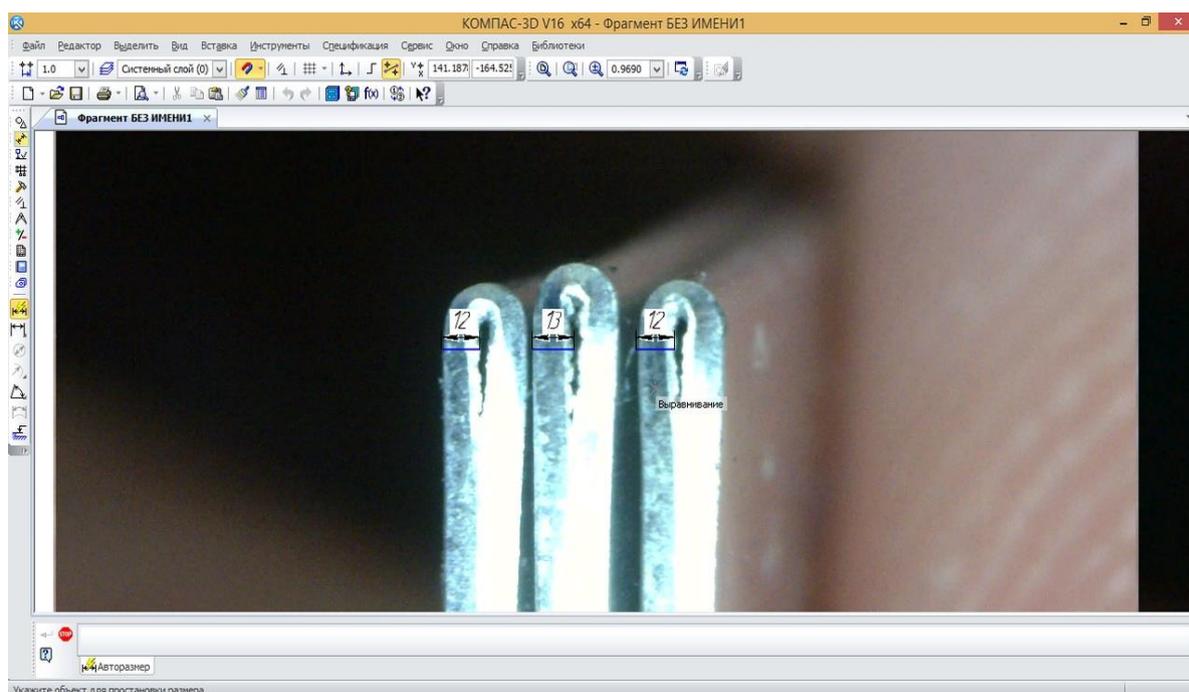


Рисунок 5.18 Определение среднего значения толщины образцов для листов толщиной 0,3мм из сплава 3005

Для образцов толщиной 0,33 мм

$$R_{cp}=15; t_{cp}=14,7.$$

$$X=\frac{14,7 \cdot 100}{0,33} = 4545,54;$$

$$r=\frac{14,7}{4545,54} = 0,0032 \text{ мм.}$$

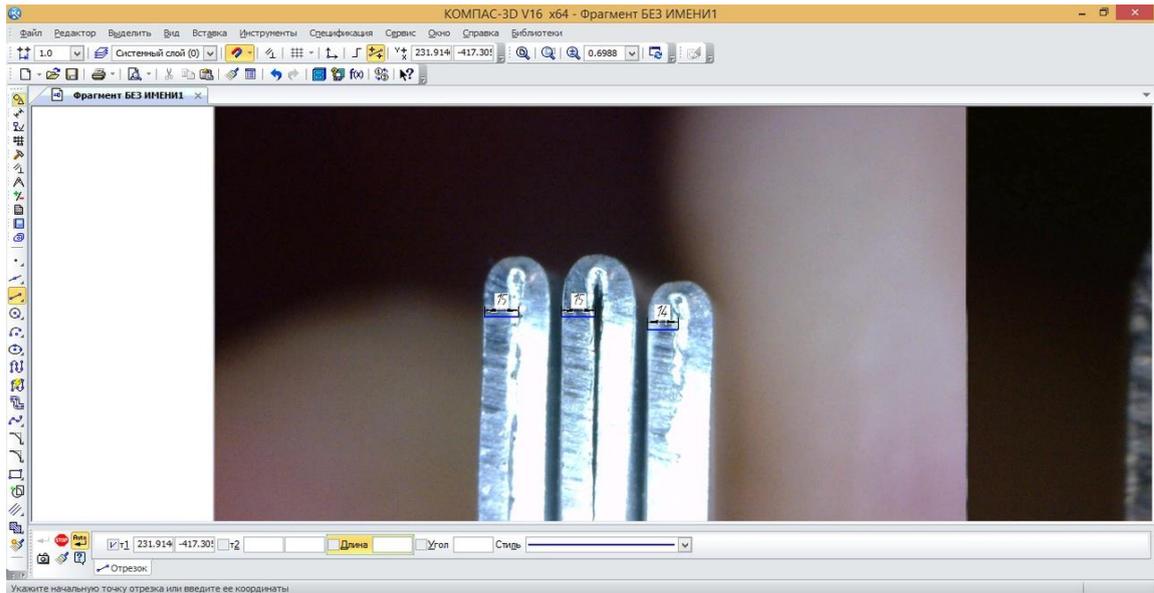


Рисунок 5.19 Определение среднего значения толщины образцов для листов толщиной 0,33 мм из сплава 3005

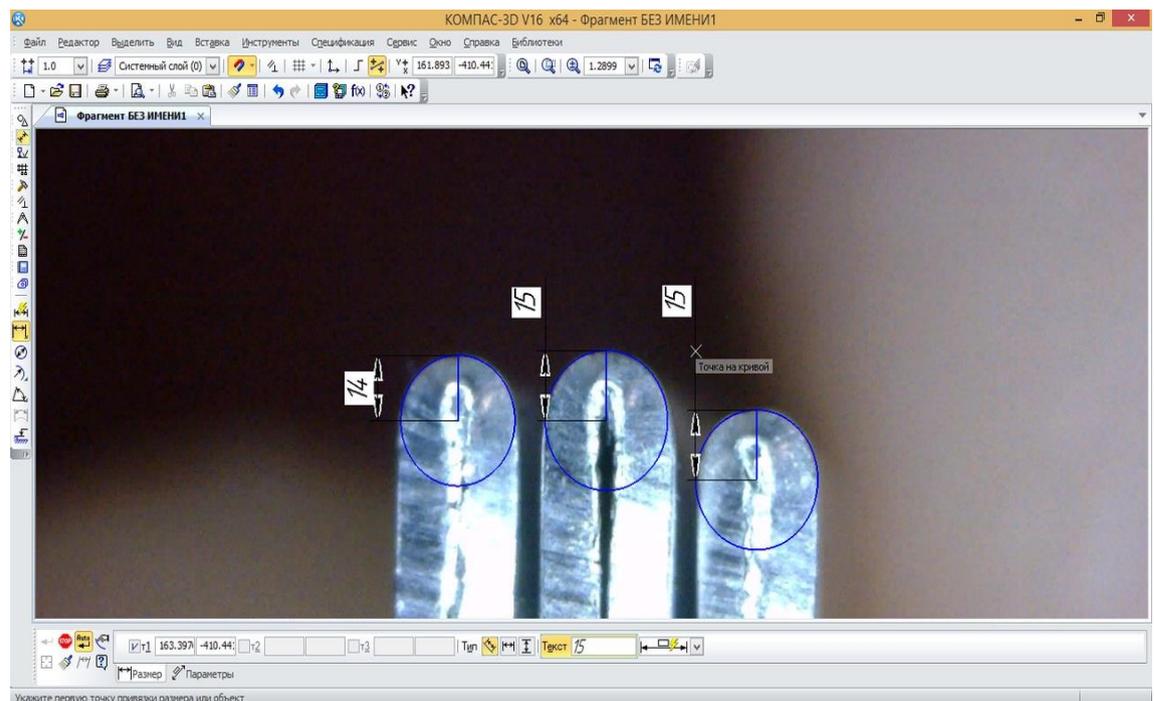


Рисунок 5.20 Определение среднего значения радиуса изгиба для листов толщиной 0,33 мм из сплава 3005

Для образцов толщиной 0,46 мм

$$R_{cp}=24; t_{cp}=16.$$

$$X = \frac{16 \cdot 100}{0,46} = 3478;$$

$$r = \frac{24}{3478} = 0,006 \text{ мм.}$$

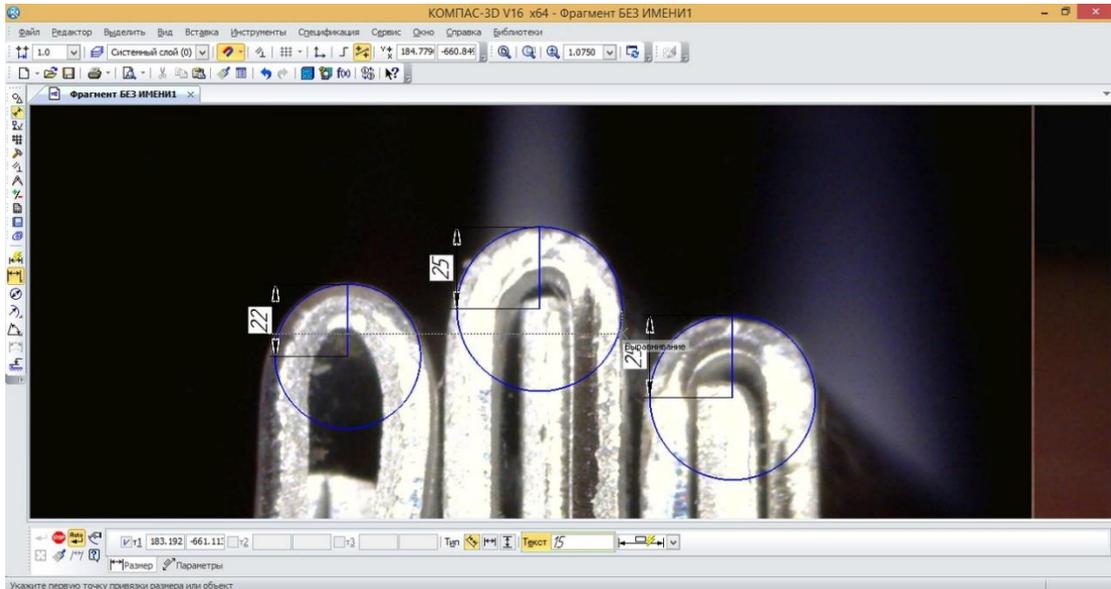


Рисунок 5.21 Определение среднего значения радиуса изгиба для листов толщиной 0,46 мм из сплава 3005

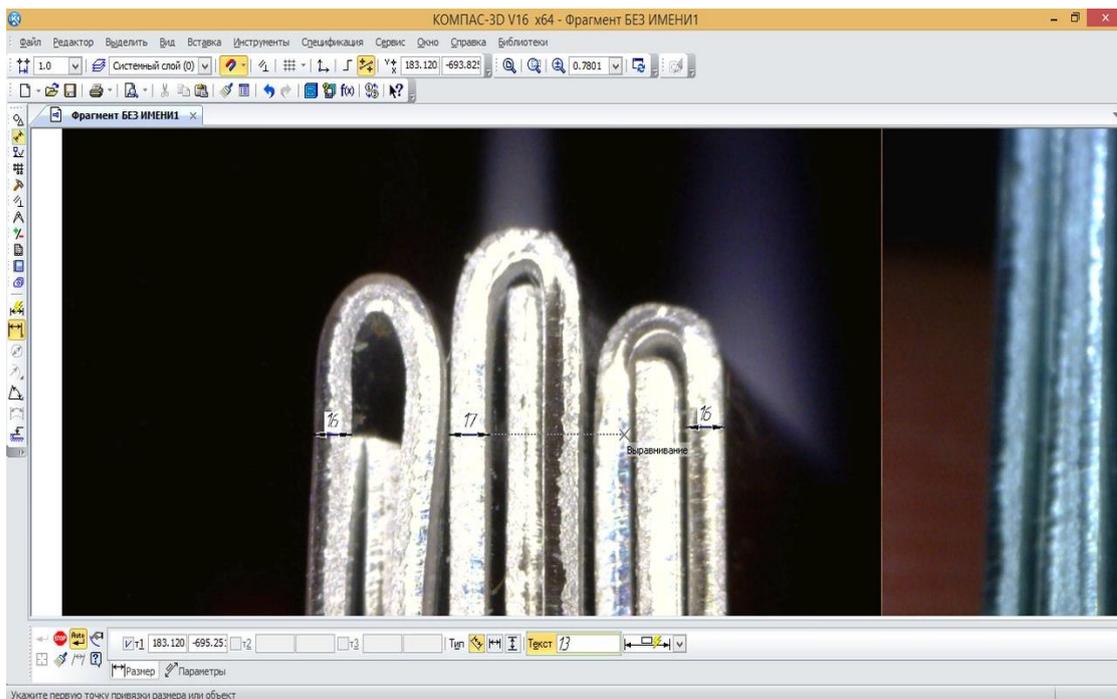


Рисунок 5.22 Определение среднего значения толщины образцов для листов толщиной 0,46 мм из сплава 3005

Результаты вычислений представлены в таблице 5.1

Таблица 5.1 – Минимальные радиусы изгиба

Толщина металла (S), мм	0,25	0,3	0,33	0,46
Радиус сгиба (R), мм	0,0041	0,0032	0,0032	0,0043
Минимальный радиус гибки (R/S)	0,016	0,011	0,010	0,009

Стоит заметить, что металл толщиной 0,3, 0,33, 0,46 мм при достижении минимального радиуса гибки не разрушается, образец толщиной 0,25 мм в процессе гибки разрушился.

Для того, чтобы произвести изгиб образца толщиной 0,25 мм на 180° необходимо учесть его минимальный радиус и выбрать тип поджима: закрытый (рисунок 5.23) или открытый (рисунок 4.24)

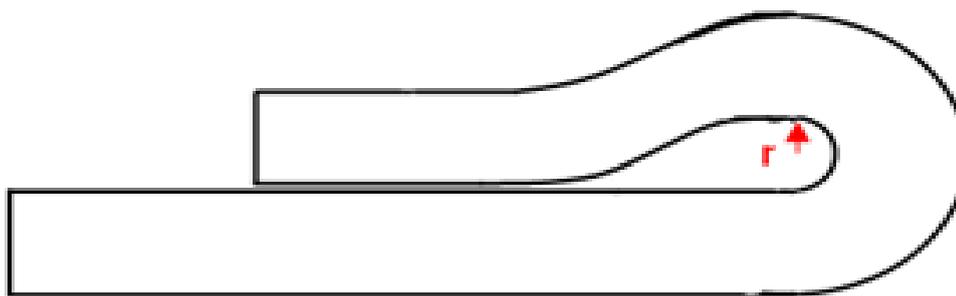


Рисунок 5.23 – Закрытый тип поджима

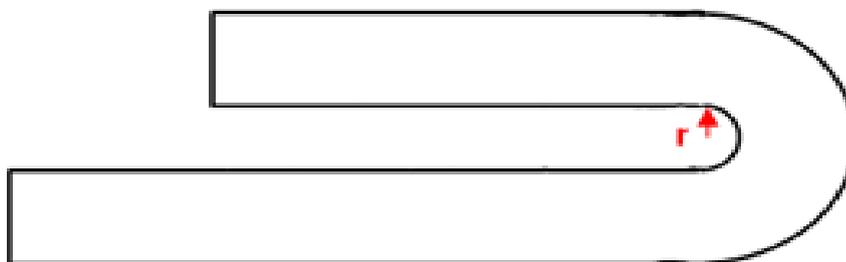


Рисунок 5.24 – Открытый тип поджима

Если радиус гибки меньше значения, то внешняя (растянутая) поверхность приобретает структуру «апельсиновой корки». При сильной зернистости

подобного рода металл может потрескаться или сломаться совсем. В любом случае, любое покрытие металла в месте перегиба существенно пострадает, и заготовка не выдержит проверки временем.

5.6 Выводы по главе 5

На образцах толщиной 0,25 и 0,33 мм сплава 3005 со стандартным средним химическим составом после прокатки, отжига на линии непрерывной термообработки и испытаний на перегиб обнаружены микротрещины в месте изгиба, а на алюминиевых образцах со сниженным содержанием марганца на $0,03 \div 0,8\%$ и повышенным содержанием магния на $0,04 \div 0,8\%$ относительно средних значений дефектов поверхности изгиба нет.

Способность алюминиевых листов к операциям гибки и штампуемости зависит от размера зерна и его однородности. С увеличением однородности зернистой структуры повышается пластичность алюминиевых листов толщиной менее 1,0 мм, что благоприятно сказывается на процессах гибки и штамповки. Важно отметить, что качественная зернистая структура сплавов имеет ключевое значение для обеспечения оптимальной работоспособности металла при деформации.

Структурные превращения, происходящие в алюминиевых сплавах 3005 и 5182 в процессе отжига, оказывают существенное влияние на их прочностные и пластические свойства. С увеличением температуры отжига наблюдается снижение прочности и увеличение пластичности материалов. Для достижения оптимального сочетания пластичности и технологичности важно поддерживать температуру отжига в узком интервале: $270 \pm 5^\circ\text{C}$ для сплава 3005 и $280 \pm 5^\circ\text{C}$ для сплавов 5182. Эти параметры позволяют добиться лучших характеристик материалов при их последующей обработке и использовании в различных отраслях промышленности.

Предложенный способ количественной оценки штампуемости в зависимости от рельефа поверхности изгиба позволяет количественно оценить и выявить

изменение пригодности тонких листов к гибочным операциям в зависимости от степени холодной пластической деформации и отжига. При холодной прокатке сплава 3005 увеличение степени обжатия с 85% до 92% приводит к снижению его штампуемости в 1,35 раза. Следует отметить, что данный процесс оказывает существенное влияние на качество материала. В процессе отжига штампуемость увеличивается, однако при уменьшении толщины листа способность к восстановлению штампуемости снижается в 1,5 раза. Таким образом, важно тщательно контролировать параметры процесса прокатки и отжига для достижения оптимальных свойств сплава 3005.

Легирование марганцем и магнием оказывает влияние на склонность алюминиевых сплавов к устойчивости кристаллографической текстуры при отжиге тонких листов. Присутствие марганца в количестве около 1% в сплаве 3005 по сравнению с техническим алюминием А5 приводит к более заметному изменению полюсной плотности основных кристаллографических плоскостей и увеличению доли бестекстурной составляющей в листах толщиной 0,25 мм в результате отжига. Присутствие магния в количестве около 4,5% в сплаве 5182 сдерживает изменение полюсной плотности основных кристаллографических плоскостей в результате отжига листов толщиной 0,25 мм.

Определены основные ориентировки и объемные доли основных компонентов текстуры деформации и рекристаллизации алюминиевых листов толщиной менее 1,0 мм. Определено влияние толщины алюминиевых листов и режимов термической обработки на объемные доли ориентировок и их влияние на способность к гибочным операциям. Формирование кристаллографической текстуры и текстурной энтропии в алюминиевых сплавах тесно связано с процессом поворота в пространстве вокруг общей оси $\langle 111 \rangle$ на угол $30...40^\circ$ кристаллографических плоскостей рекристаллизованных зёрен по отношению к решётке зёрен холоднокатаного алюминия. Этот закономерный процесс влияет на структуру сплава и его свойства. С учетом угла поворота кристаллографических плоскостей рекристаллизованных зёрен, алюминиевые сплавы могут обладать различной кристаллической ориентацией, что определяет их механические и

физические свойства. При отжиге образцов толщиной в интервале 0,25...0,92 мм, происходит почти двукратное увеличение бестекстурной составляющей с 35% до 60%. Распределение полюсной плотности в порядке убывания для холоднокатаных образцов – бестекстурная составляющая, $S''^2(341)\langle 4-58 \rangle$, $Va'(493)\langle 5-47 \rangle$, $Vs(110)\langle 1-12 \rangle$, $S''(385)\langle 7-54 \rangle$, $Cu'(113)\langle -6-65 \rangle$, для отожжённых образцов – бестекстурная составляющая, $S''^2(341)\langle 4-58 \rangle$, $Va'(493)\langle 5-47 \rangle$, $Cu''(449)\langle -6-65 \rangle$, $Vs(110)\langle 1-12 \rangle$.

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 $Vs'(110)\langle 1-12 \rangle$, 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 $Vs(110)\langle 1-12 \rangle$ на холоднокатаных листах толщиной 0,25мм 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 $Vs(110)\langle 1-12 \rangle$ значительно снижается по сравнению с холоднокатаным состоянием, что определённо приводит к росту штампуемости.

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, 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%; 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, отожженного 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 $0,03 \div 0,8\%$ и повышенным содержанием магния на $0,04 \div 0,8\%$ 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, $S''^2(341)\langle 4-58 \rangle$, $Va'(493)\langle 5-47 \rangle$, $Vs(110)\langle 1-12 \rangle$, $S''(385)\langle 7-54 \rangle$, $Cu'(113)\langle -6-65 \rangle$, для отожжённых образцов – бестекстурная составляющая, $S''^2(341)\langle 4-58 \rangle$, $Va'(493)\langle 5-47 \rangle$, $Cu''(449)\langle -6-65 \rangle$, $Vs(110)\langle 1-12 \rangle$. 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 $Vs'(110)\langle 1-12 \rangle$, 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 $Vs(110)\langle 1-12 \rangle$ 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 $Vs(110)\langle 1-12 \rangle$ 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.

Список использованных источников

1. Abobaker M., Bouaziz O., Lebyodkin M., Lebedkina T., Shashkov I.V. Avalanche dynamics in crumpled aluminum thin foils / M. Abobaker // Scripta Materialia. – 2015. – №99. – С. 17-20.
2. Kals T.A., Eckstein R. Miniaturization in sheet metal working / T.A. Kals // Materials Processing Technology. – 2000. – №103. – С. 95–101.
3. Wang C., Ma L., Ma X., Wang T., Jiang Z., Hasan M., Zhao J. Effect of annealing temperature on microstructure and tensile properties of copper/aluminum composite thin strip / C. Wang // Metals Society of China. – 2023. – №33. – С. 701-713.
4. Fernandez R., Bruno G., Gonzalez-Doncel G. Neutron and synchrotron radiation diffraction study of the matrix residual stress evolution with plastic deformation in aluminum alloys and composites / R. Fernandez // Materials Science and Engineering. – 2008. – №487. – С. 26-32.
5. Шор Э.Р. Производство листов из алюминиевых сплавов / Э. Р. Шор, А. И. Колпашников. – М.: Металлургия, 1967. – 319 с.
6. Зегер А. Перегибы на дислокациях и их влияние на внутреннее трение в кристаллах / А. Зегер, П. Шиллер // Физическая акустика. М.: Мир, 1969. – Т. 3. – С. 428 - 573.
7. Киселёв С. П. Внутренние напряжения в твёрдом теле с дислокациями [Текст]/ С. П. Киселёв// Прикладная механика и техническая физика, 2004. – Т. 45, № 4. – С. 131 – 136.
8. Колпашников А.И. Прокатка листов из легких сплавов: учебное пособие для вузов по специальности "Обработка металлов давлением" / А. И. Колпашников. – Изд. 2-е, переработанное и дополненное – М.: Металлургия, 1979. – 264 с.

9. Колобов, В. Г. Разработка термомеханических режимов прокатки тонких алюминиевых лент с рациональным для штамповки комплексом механических свойств и анизотропии: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Колобов Владимир Геннадьевич. – Самара, 2013. – 144 с.

10. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л. Ф. Мондольфо. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.

11. Вайнблат Ю. М. Диаграммы структурных состояний и карты структур алюминиевых сплавов / Ю. М. Вайнблат // Изв. АН СССР, Металлы. – 1982. – № 2. – С. 82-89.

12. ГОСТ 4784-2019 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Международный стандартный книжный номер. Использование и издательское оформление. – М.: Стандартиформ, 2019. – 30 с.

13. Гуляев А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

14. Арзамасов Б. Н. Материаловедение: учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макаров, Г. Г. Мухин. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 648 с.

15. Мальцев М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / М. В. Мальцев. – М., 2012. – 367 с.

16. Кузнецов, А. О. Влияние химического состава на структуру и свойства сплава системы Al-Mg-Si / А. О. Кузнецов, М. С. Оглодков, А. А. Климкина // Труды ВИАМ. – 2018. – № 7(67). – С. 3-9.

17. Колачѐв Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б. А. Колачѐв, В. А. Ливанов, В. И. Елагин. – М.: МИСИС, 1999. – 416 с.

18. DIN EN 573-3-2019. Aluminium and aluminium alloys – Chemical composition and form of wrought products - Part 3: Chemical composition and form of products. – German version EN 573-3:2019. – 38 с.

19. Новиков И.И. *Металловедение, термообработка и рентгенография* / И.И. Новиков, Г.Б. Строганов, А. И. Новиков. – М.: МИСИС, 1994. – 480с.
20. Мозберг Р. К. *Материаловедение. Учеб. Пособие* / Р. К. Мозберг. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 1991. – 448 с.
21. Новиков И. И. *Теория термической обработки металлов* / И. И. Новиков. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.
22. Новиков И. И. *Кристаллография и дефекты кристаллической решётки* / И. И. Новиков, К. М. Розин. – М.: Металлургия, 1990. – 336 с.
23. Горелик С.С. *Рекристаллизация металлов и сплавов* / С. С. Горелик. – М.: Металлургия, 1978. –568 с.
24. Лариков Л. Н. *Механизм рекристаллизации деформированных металлов* / Л. Н. Лариков, Е. Э. Засимчук // *Изучение дефектов кристаллического строения металлов и сплавов, сер. ФМ.* – Киев, 1966. – С. 70.
25. Weiss M. *Effect of Residual Stress on the Bending of Aluminium* / M. Weiss // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2012. – № 4. – С. 877–883.
26. Патент № 2817362 С1 Российская Федерация, МПК С22С 21/02, С22С 21/06. *Деформируемый сплав системы алюминий-магний-кремний и изделие из этого сплава: № 2023122668: заявл. 31.08.2023: опубл. 15.04.2024* / А. М. Дриц, В. В. Овчинников, В. Ю. Арышенский, Н.А. Белов; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Московский политехнический университет".
27. Цыденов, Н. А. *Сравнительный анализ влияния магния и цинка на структуру и механические свойства горяче- и холоднокатаных листов сплава Al-2%Cu-1,5%Mn* / К. А. Цыденов, Н. А. Белов, В. В. Дорошенко // *Металлург.* – 2024. – № 3. – С. 78-84.

28. ГОСТ 21631-2023. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. Международный стандартный книжный номер. Использование и издательское оформление. – М.: Стандартинформ, 2008. - 30 с.

29. Шалин, Р.Е. Авиационные материалы: Справочник в девяти томах / Р.Е. Шалин, С.И. Кишкина, И.Н. Фридляндер. – Изд. 6-е, перераб. и доп. - М.: ОНТИ, 1975.

30. Носова, Е. А. Формирование в листах алюминиевых сплавов при термической и деформационной обработке упорядоченной структуры для повышения их штампуемости : дис. ... д-ра техн. наук : 26.17.00 / Носова Екатерина Александровна, 2022. – 340 с.

31. Мизери А. А. Методика определения остаточных осевых напряжений в поверхностных слоях сплошных цилиндров / А. А. Мизери, З. Ш. Ротенберг – ИВУЗ, Машиностроение, 1971, №4 – С. 82-89.

32. Named A. Effect of predeformation and heat treatment conditions in the SIMA process on micro structural and mechanical properties of A319 aluminum alloy / A. Named, Kh. Razieh, K. Named, Kh. Farzad // J. Alloys and Compounds. – 2009. – №2. – С. 130 - 135.

33. Тептерев, М. С. Термическая и термомеханическая обработка листов из сплава 1565ч с целью формирования в них структуры, заданных механических, технологических и эксплуатационных свойств: дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / Тептерев Максим Сергеевич, 2021. – 165 с.

34. Якунин Л.С. Использование метода наименьших квадратов для исследования остаточных напряжений / Якунин Л.С. // Зав. лаб. №10. – 1966. – С. 98–106.

35. Моносзон А. И. О работах Калакутского по исследованию внутренних напряжений / Моносзон А. И. // Зав. лаб. №4. – 1950. – С. 187-199.

36. Поварова К. Б. Влияние деформации и рекристаллизации на структуру и некоторые свойства сплавов на основе RUAL / К. Б. Поварова, Н. К. Казанская, А. А. Дроздов, О. А. Скачков // *Металлы*. – 2004. - № 6. – С. 91 – 95.
37. Горелик С.С. Возврат, полигонизация и рекристаллизация / С. С. Горелик // *Металловедение и термическая обработка стали*. – М.: *Металлургия*, 1983. – С. 226 – 226.
38. Муратов В. С. Влияние термической обработки на структуру и свойства алюминиевых сплавов при повышенной температуре / В. С. Муратов, М.Д. Азизов // *Успехи современного естествознания*. – 2006. – № 10 – С. 98.
39. Wang, B., Chen, X., Pan, F., Mao, J., & Fang, Y. Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminum alloy / B. Wang // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2015. – №25, С. 2481–2489.
40. Aryshenskii E.V., Kawalla R., Aryshenskii V.Yu., Schmidt C. Investigation of Texture and Structure Evolution during Hot Rolling of 1070, 3104 and 8011 / E.V. Aryshenskii // *Aluminum Alloys in Continuous Mill. Metallurgia Italiana*. – 2017. – №3. – С. 11–21.
41. Новиков И. И. *Металловедение, термообработка и рентгенография* / И.И. Новиков, Г. Б. Строганов, А. И. Новиков. – М.: МИСИС, 1994. – 480с.
42. Оглодков М.С. Особенности закалки широких обшивочных плакированных листов из алюминиевого сплава В95п.Ч. На линии непрерывной термической обработки / Т. А. Нечайкина, М. С. Оглодков, А. Л. Иванов // *Труды ВИАМ*. – 2021. – № 11(105). – С. 25-33.
43. Rankin Jon E., Hill Michael R., Hackel Lloyd A. The effects of process variations on residual stress in laser peened 7049 T73 aluminum alloy / Rankin Jon E., Hill Michael R., Hackel Lloyd A. // *Materials Science and Engineering*. – 2003. – №1. – С. 279- 291.

44. 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.

45. Савельева, О. Г. Разработка режимов термической и деформационной обработки листов из сплавов систем Al-Mg и Al-Cu-Mg для формирования структуры, остаточных напряжений и технологических свойств, обеспечивающих улучшение штампуемости: дис. ... канд. техн. наук : 05.16.09 / Савельева Оксана Григорьевна. – Самара, 2013. – 160 с.

46. Dolan G. Residual stress reduction in 7175-T73, 6061-T6 and 2017A-T4 aluminium alloys using quench factor analysis /G. P.Dolan, J. S. Robinson // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – С. 346-351.

47. Гречников Ф. В. Изучение анизотропии свойств листовых полуфабрикатов из сплава АМг10 / Гречников Ф. В., Носова Е. А., Савельева О.Г. // Научно – технический и производственный журнал «Металловедение и термическая обработка металлов» – 2009. – № 7 (649). – С. 10 – 13.

48. Арышенский Ю.М. Получение рациональной анизотропии в листах / Ю. М. Арышенский, Ф. В. Гречников, В. Ю. Арышенский; ред. Ф. В. Гречников. – Москва: Metallurgia, 1987. - 141 с.: ил., табл. - Библиогр.: с. 140-141.

49. Гречников Ф. В. Влияние анизотропии свойств листов на параметры штамповки / Ф. В. Гречников, В. В. Уваров // Тезисы докладов II-ой отраслевой конференции по листовой штамповке. – М., 1979. – С. 62 -63.

50. Арышенский Ю. М. О предельных возможностях материала в процесс листовой штамповке / Ю. М. Арышенский, Ф. В. Гречников, В. В. Уваров // Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Современные проблемы технологии машиностроения». – М. МВТУ. – 1985. – С. 147.

51. Гречников Ф. В. Влияние режимов отжига на показатели анизотропии листовых алюминиевых сплавов / Ф. В. Гречников // Межвузовский сборник «Стали и сплавы цветных металлов». - Куйбышев: КуАИ. – 1974.

52. Уваров В.В. Изучение влияния термообработки на характер анизотропии листовых алюминиевых сплавов / В. В. Уваров, Ф. В. Гречников // Тезисы докладов областной научной – технической конференции. – Куйбышев, 1977. – С. 32.

53. Арышенский Ю. М. Влияние термомеханического воздействия на формирование анизотропии при прокатке листов / Ю. М. Арышенский, В. В. Уваров, Ф. В. Гречников // Тезисы докладов II Всесоюзной конференции «Теплофизика технологических процессов». – Ташкент, 1984. – с. 58.

54. Уваров В.В. Формирование свойств анизотропных материалов из Al – сплавов для автомобилестроения / В. В. Уваров, Ф. В. Гречников // Тезисы докладов III Всесоюзной конференции «Теплофизика технологических процессов». - Тольятти, 1979. – с. 63-64.

55. Арышенский Ю. М. Определение требований к анизотропии листов в зависимости от вида последующей штамповки / Ю. М. Арышенский, Ф. В. Гречников, В. В. Уваров // Кузнечно - штамповочное производство. 1990. - № 3. – С. 16 – 19.

56. Гречников Ф. В. Влияние режимов термообработки на анизотропию свойств в листовых алюминиевых сплавах / Ф. В. Гречников, В. В. Уваров // Межвузовский сборник «Порошковая металлургия». – Куйбышев, 1990. – С. 125 – 129.

57. Арышенский В. Ю. Перспективы использования анизотропии кристаллов для повышения предельной деформации листовых материалов / В. Ю. Арышенский, Г. В. Черепок, Ф. В. Гречников, В. М. Зайцев // Технология лёгких сплавов. – М.: Всероссийский институт лёгких сплавов, 1999. - № 5. – С. 18 – 22.

58. Гречников Ф. В. Деформирование анизотропных материалов / Ф. В. Гречников. – М.: Машиностроение, 1998. – 448 с.
59. Малов А. Н. Технология холодной штамповки / А. Н. Малов. – М.: Машиностроение, 1969. – 568 с.
60. Кухтаров В. И. Холодная штамповка / В. И. Кухтаров. – М. МАШГИЗ, 1962. – 404 с.
61. Anjabin N. Physically based material model for evolution of stress-strain behavior of heat treatable aluminum alloys during solution heat treatment / Anjabin N., Taheri A. Karimi // *Materials and Design*. – 2010. – № 1. – С. 433-437.
62. Hongfeng Wang. Numerical analysis of surface residual stress of NC milling 7075-T7451 aluminum alloy / Hongfeng Wang, Dunwen Zuo, Litao Wang, Hong Miao // *Key Engineering Materials*. – 2009. – №407. – С. 718 - 722.
63. Y.-H. Chen et al. Tailoring the formability and planar anisotropy of Al-Mg-Si-Cu-Zn alloys via cross hot rolling and two-stage cold rolling / Y.-H. Chen // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2024. – №985. – С. 136-138.
64. Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов / М. Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1977. – 432 с.
65. Носова, Е. А. Исследование влияния однородности зеренной структуры на показатели пригодности к операциям листовой штамповки сплавов АМг2 и АМг6 / Е. А. Носова, А. А. Фадеева, М. А. Стародубцева // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. – 2019. – № 3. – С. 47-54.
66. Горелик С.С. Рентгенографический и электрооптический анализ. Практическое руководство / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков – М.: Металлургия, 1970. – 366 с.

67. Горелик С.С. Рентгенографический и электрооптический анализ. Приложения / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков – М.: Metallurgy, 1970. – 107 с.

68. Уманский Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я. С. Уманский, Ю. А. Скаков, А. Н. Иванов, Л. Н. Расторгуев. – М.: Metallurgy, 1982. – 632 с.

69. Juijerm P., Altenberger I. Effect of temperature on cyclic deformation behavior and residual stress relaxation of deep rolled under-aged aluminium alloy AA6110 / P. Juijerm, I. Altenberger // Materials Science and Engineering. – 2007. – №452. – С. 475-482.

70. Носова, Е.А. 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.

71. 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(47). – С. 111-119.

72. 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.

73. RenXu-dong. Effect of laser shock processing on residual stress and fatigue behavior of 6061-T651 aluminum alloy / RenXu-dong, Zhang Yong-kang, Zhou Jian-zhong, Fen Ai-xin // Trans. Nonferrous Metals Soc. China. – 2006. – №16. – С. 1305-1308.

74. Dolan G. Residual stress reduction in 7175-T73, 6061-T6 and 2017A-T4 aluminium alloys using quench factor analysis / G. P. Dolan, J. S. Robinson // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – С. 346-351.

75. Носова, Е. А. Применение энтропийного подхода для оценки доли влияния структурных особенностей на штампуемость алюминиевых сплавов / Е. А. Носова, А. П. Амосов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2022. – Т. 19, № 1. – С. 93-105.

76. Гречников, Ф. В. Исследование влияния кристаллографической текстуры металлической основы на эксплуатационные характеристики металло-матричных и металл-полимерных композиционных материалов / Ф. В. Гречников, Я. А. Ерисов // Современные достижения в области создания перспективных легких сплавов и покрытий для авиационной и космической техники: сборник докладов всероссийской научно-технической конференции, Москва, 16 апреля 2021 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2021. – С. 219-228.

77. Гречников, Ф. В. Исследование формирования текстуры, микроструктуры и анизотропии свойств в процессе прокатки листов из алюминий-литиевого сплава 1420 / Ф. В. Гречников, Я. А. Ерисов, С. В. Сурудин, М. С. Оглодков // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2017. – №6. – С. 45–52.

78. Гречников, Ф. В. Влияние параметров текстуры на устойчивость процессов формообразования анизотропных заготовок / Ф. В. Гречников, Я. А. Ерисов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т.14, в.4. – С. 293–298.

79. Беглов, Э. Д. Математическая модель процесса глубокой вытяжки анизотропной заготовки с учетом эволюции кристаллографической текстуры / Я. А. Ерисов, Е. В. Арышенский, Э. Д. Беглов, Т. У. Шакаров // *Металлургия: технологии, инновации, качество: Труды XXIV Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 15–17 октября 2024 года.* – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2024. – С. 105-107

80. Juijerm P. Effective boundary of deep-rolling treatment and its correlation with residual stress stability of Al-Mg-Mn and Al-Mg-Si-Cu alloys / P. Juijerm, I. Altenberger // *Scripta Materialia.* – 2007. – № 9. – С. 745-748.

81. Колбасников, Н. Г. Образование границ – механизм релаксации напряжений / Н. Г. Колбасников, С. Ю. Кондратьев, С. Г. Фомин // *Изв. АН СССР. Металлы.* – 1990. - № 5.

82. Колбасников, Н. Г. Энтропийная теория прочности металлов / Н. Г. Колбасников. – СПб.: СПбГУ, 1995. – 176 с.

83. Колбасников, Н. Г. Теория обработки металлов давлением. Сопротивление деформации и пластичности / Н. Г. Колбасников. – СПб.: СПбГУ, 1991. – 307 с.

84. Колбасников, Н. Г. Теория обработки металлов давлением. Физические основы прочности и пластичности / Н. Г. Колбасников. – СПб.: СПбГУ, 2004. – 268 с.

85. Rankin Jon E., Hill Michael R., Hackel Lloyd A. The effects of process variations on residual stress in laser peened 7049 T73 aluminum alloy / Rankin Jon E., Hill Michael R., Hackel Lloyd A. // *Materials Science and Engineering.* – 2003. – №1-2. – С. 279- 291.

86. Bhaumik S. Effect of stress on the annealing behavior of severely plastically deformed aluminum alloy 3103 / S. Bhaumik, X. Molodova, G. Gottstein // *Materials Science and Engineering.* – 2010. – №21-22. – С. 5826-5830.

87. Носова, Е. А. Исследование энтропии кристаллографической текстуры листовых алюминиевых сплавов после деформации и термической обработки / Е. А. Носова // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 269-274.

88. Mishra, S. Effect of crystallographic texture on precipitation induced anisotropy in an aluminium magnesium silicon alloy / S. Mishra, K. N. Kulkarni, N.P. Gurao // *Materials and Design*. – 2015. – V.87. – P. 507–519.

89. Waqas, M. Experimental and numerical investigation of texture evolution and the effects of intragranular backstresses in aluminum alloys subjected to large strain cyclic deformation / M. Waqas, P. Abhijit. A. Brahme, J. Kang // *International Journal of Plasticity*. – 2017. – V.93. – P. 137–163.

90. Ezatpour, H.R. Investigation of work softening mechanisms and texture in a hot deformed 6061 aluminum alloy at high temperature / H. R. Ezatpour, M. Sabzevar, S. A. Sajjadi // *Materials Science & Engineering A*. – 2014. – V.606. – P. 240–247.

91. Li, F. On the role of texture in governing fatigue crack propagation behavior of 2524 aluminum alloy / F. Li, Zh. Liu, W. Wu // *Materials Science & Engineering A*. – 2016. – V.669. – P. 367–378.

92. Гречников Ф. В., Арышенский В. Ю. Научные основы и механизмы управления текстурообразованием и анизотропией деформационных характеристик материалов / Ф. В. Гречников, В. Ю. Арышенский // В сб. трудов 3-й Международной научно-технической конференции «Металлофизика, механика материалов, наноструктур и процессов деформирования. Металлдеформ - 2009». – Самара: издательство Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева, 2009. – С. 49–57.

93. Grechnikov, F.V. A study of the anisotropy of properties of sheet semiproducts from alloy amg10 Metal / F. V. Grechnikov, E. A. Nosova, O. G. Savel'eva // *Science and Heat Treatment*. – 2009. – V.51, No.7-8. – P. 326–329.

94. DIN EN 485-2:2016. Aluminium and aluminium alloys – Sheet, strip and plate - Part 2: Mechanical properties. – German version EN 485-2:2016. – 91 с.

95. Филатов, Ю. А. Работы ВИЛСа по деформируемым алюминиевым сплавам системы Al-Mg-Sc. История создания, структура, свойства, опыт применения, проблемы и перспективы / Ю. А. Филатов // Технология легких сплавов. – 2017. – № 3. – С. 7-24.

96. Васильков С. Д. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из алюминиевого сплава после механической обработки / С. Д. Васильков, А. С. Александров, И. В. Афанасьев И. В. // Инструмент и технологии. - М., 2008. - № 30-31. - С. 67-70.

97. Зайдес А. Поверхностное пластическое деформирование / Зайдес А., Забродин В. А., Мураткин Г. В. // ИрГТУ-Иркутск – 2002. – 304 с.

98. Рудской А. И. Теория и технология прокатного производства / А. И. Рудской, В. А. Лунёв, СПб.: Наука, 2008 – 527 с.

99. ISO 6892–1:2019 Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature. – 86 с.

100. Финк К. Измерение напряжений и деформаций / К.Финк, Х.Рорбах– М.: Машгиз, 1961. – 536 с.

101. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Использование и издательское оформление. – М.: Стандартиформ, 2003. – 36 с.

102. Tribunskiy, A. V. Effect of manganese and magnesium content and conditions of annealing on mechanical properties and cracking formation during bending of aluminum alloy aa3005 / A. V. Tribunskiy, E. A. Nosova, V. Yu. Aryshenskiy // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – P. 476-482.

103. Шибков А. А. Структурно-чувствительные переходы от скачкообразной к чувствительной пластической деформации сплавов Al-Mg [Текст] / А. А. Шибков, А. Е. Золотов, Д. В. Михлик, М. А. Желтов, А. В. Шуклинов, В. В. Скворцов. – Современные металлические материалы и технологии (СММТ – 2009) – СПб: СПбГУ. – 2009. – С. 546-548.

104. 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.

105. 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.

Приложение А. Акт внедрения результатов АО «Самарский металлургический завод»



Акционерное общество
«Самарский металлургический завод»
(АО «СМЗ», ОГРН 1026300763389)

443051, Россия, г. Самара
ул. Алма-Атинская, 29, корп. 33/34

[Info.smz@samara-metallurg.ru](mailto:info.smz@samara-metallurg.ru)

Тел.: 8 846 278 34 12

Факс: 8 846 278 34 14

www.samara-metallurg.ru

АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования
Трибунского Александра Викторовича
на тему «Формирование рациональной структуры в тонких листах и лентах из
алюминиевых сплавов для повышения их штампуемости»

Настоящим актом подтверждается, что результаты научной работы Трибунского Александра Викторовича используются на АО «Самарский металлургический завод».

Посвященные изучению закономерности формирования структуры и свойств материалов в зависимости от параметров обработки при производстве тонких листов из алюминиевых сплавов А5, 3005 представляют собой ценный практический материал. Эти данные используются в производственных процессах в качестве справочных материалов при изготовлении алюминиевых листов для листовой штамповки, для глубокой вытяжки и гибки.

В ходе исследования было проведено множество лабораторных и промышленных экспериментов. Опытные партии рулонов были отправлены Заказчикам для переработки, получены положительные отзывы. На основании полученных результатов внесены корректировки в технологию производства тонких алюминиевых листов. В результате внедрения в практику АО «СМЗ» разработанной методики количественной оценки балла штампуемости зафиксировано сокращение брака на 4,7 % по несоответствию изгиба с углом 180 градусов и повышение выхода годного с 63,7 до 64,9 % при производстве архитектурной и строительной алюминиевой ленты из сплавов А5 и 3005.

Главный прокатчик АО «СМЗ»
Д.т.н.
Заслуженный металлург РФ

Директор по прокатному производству АО «СМЗ»
К.т.н.



В.Ю. Арышенский

А.М. Оводенко

22.01.2025г.

Приложение Б. Акт внедрения результатов АО «АлТи Фордж»



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
АО «АлТи Фордж»



В. Я. Павлов

АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования А.В. Трибунского
«Формирование рациональной структуры в тонких листах и лентах из
алюминиевых сплавов для повышения их штампуемости»

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Трибунского А.В., а именно полученные закономерности формирования структуры и технологических свойств в зависимости от параметров обработки при изготовлении тонких листов из алюминиевых сплавов представляют практический интерес, могут быть рекомендованы к проведению производственных испытаний и внедрению как справочные данные при изготовлении алюминиевых листов для листовой штамповки.

В рамках исследований была проведена серия лабораторных и промышленных экспериментов. Образцы опытных партий подвергались металлографическому и текстурному анализу, а также испытаниям на определение механических и эксплуатационных свойств. По результатам исследований была разработана оптимальная технология производства листов.

Начальник ТО ППШ

И.В. Кривопапов

Приложение В. Акт внедрения результатов в учебный процесс Самарского университета



АКТ

о внедрении диссертационного исследования в учебный процесс

Результаты диссертационного исследования Трибунского Александра Викторовича «Формирование рациональной структуры в тонких листах и лентах из алюминиевых сплавов для повышения их штампуемости» внедрены в учебный процесс на кафедре технологии металлов и авиационного материаловедения на основании решения кафедры (протокол №8 от «06» марта 2025 г.). Указанные результаты используются в учебном процессе при подготовке аспирантов по направлению 22.06.01 – Технологии материалов по дисциплине «Металловедение и термическая обработка» и «Подготовка научно-квалификационной работы (диссертации) на соискание учёной степени кандидата технических наук» (Учебный план 22.06.01(05.16.01)-2021-О-4г-А).

Заведующий кафедрой ТМиАМ
д.т.н., доцент

Носова /Носова Е.А.
« 02 » 04 2025 г.

Инженер кафедры ТМиАМ

Трибунский /Трибунский А.В.
« 02 » апреля 2025 г.

Начальник отдела
аспирантуры и докторантуры
к.т.н., доцент

Родионова /Родионова Е.В.
« 03 » 04 2025 г.

Начальник отдела сопровождения
научных исследований
к.т.н., доцент

Родионов /Родионов Л.В.
« 04 » 04 2025 г.