

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

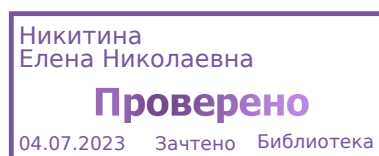
Наумова Алена Вадимовна

**Исследование влияния газолазерной резки на структуру и
механические свойства алюминиевых сплавов с применением
компьютерной металлографии**

Направление подготовки
15.04.03 – «Прикладная механика»

АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2023



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный университет»

Научный руководитель

кандидат технических наук,
доцент кафедры МТНМ
Белова Инна Валерьевна

Рецензент

ведущий научный сотрудник
Лаборатории в ИМИМ ДВО РАН
кандидат технических наук,
доцент

Жилин Сергей Геннадьевич

Защита состоится «28» июня 2023 года в 09 часов 00 мин на заседании
государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки
15.04.03 – «Прикладная механика» в Комсомольском-на-Амуре
государственном техническом университете по адресу: 681013, г.
Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 202/2.

Автореферат разослан ____ июня 2023 г.

Секретарь ГЭК



Бурдасова Александра Александровна

Целью и задачи исследования

Целью данной работы является исследование влияния газолазерной резки на структуру и свойства алюминиевых сплавов, определение влияния лазерного раскроя на структуру металла с применением компьютерной металлографии. В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие основные **задачи исследования:**

- Проанализировать номенклатуру авиационных алюминиевых сплавов.
- Проанализировать номенклатуру деталей, которые изготавливаются из тонкостенных алюминиевых полуфабрикатов листов, труб, профилей.
- Изучить технологию газолазерной резки металлов.
- Проанализировать влияния лазерного раскроя на структуру материала, изменения его свойств с применением металлографических исследований.
- Результирующий вывод о применимости лазерных технологий.
- Результирующий вывод о применимости методики исследования

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются авиационные алюминиевые сплавы. Предметом исследования является применение методики металлографического исследования.

Метод исследования. Для изучения зоны лазерного влияния (ЗЛВ) проводили металлографический анализ.

Новизна полученных результатов:

В работе проведен анализ полученных данных после металлографического исследования при влиянии газолазерной резки на структуру и свойства алюминиевых сплавов, определение характера влияния лазерного раскроя на структуру металла. Результирующий вывод о применимости методики исследования

Достоверность и обоснованность результатов исследования.

Достоверность полученных и представленных в диссертации результатов подтверждается использованием современных независимых, взаимодополняющих методов исследования, большим объемом непротиворечивых экспериментальных данных, согласованность с данными теоретических исследований. Анализ экспериментальных данных проведен с соблюдением критериев достоверности измерений.

Практическая значимость и ценность работы.

Практическая значимость работы заключается в получении результата – методика исследования металлографического анализа авиационных алюминиевых сплавов применима.

Металлографический анализ предусматривает выявление дефектов, особенностей структуры и, как следствие, прогнозирование поведения металлов в эксплуатационных условиях.

Личный вклад автора.

Представленные в работе результаты получены лично автором или при его непосредственном участии.

Анализ литературных источников, изучении экспериментальных исследований, а также обработка и анализ результатов экспериментов выполнены лично автором. Постановка задач исследований и обсуждение результатов проведено при непосредственном участии автора совместно с научным руководителем.

Основные положения, выносимые на защиту:

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты работы:

- методика металлографического исследования;
- исследования влияния режимов газолазерной резки на свойство материалов с применением металлографического анализа.

Структура и объём магистерской диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка использованных источников. Общий объём работы составляет 85 страниц, включая 27 рисунков, 9 таблиц, список используемых источников, состоящий из 25 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснования актуальности темы диссертационной работы, изложены основные направления проведённых исследований, сформулированы цель и задачи исследований.

В первом разделе приведен анализ номенклатуры, свойства, виды и применение авиационных алюминиевых сплавов.

Во втором разделе детали, применяемые в самолетостроении из авиационных алюминиевых сплавов, а также Автоматизированная обработка деталей самолета.

В третьем разделе описывается технология газолазерной резки металлов.

В четвертом разделе изложены методика металлографических исследований, которая включает в себя методику приготовления шлифа, методику травления, методику работы на микроскопе «Nikon», методику работы в Image - PRO Plus версии 5.1, и методика определения твердости.

В пятом разделе диссертационной работы приведены результаты исследования влияния режимов газолазерной резки на свойство материалов с применение металлографического анализа.

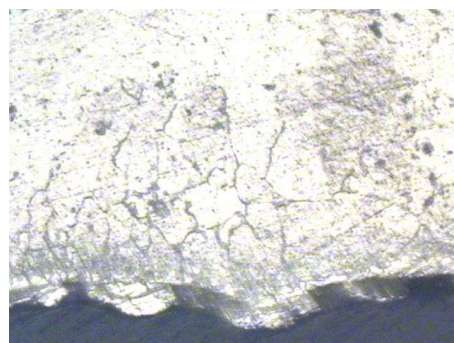
Основная цель: исследование влияния газолазерной резки на структуру и свойства алюминиевых сплавов, определение влияния лазерного раскроя на структуру металла с применение компьютерной металлографии.

Для изучения зоны лазерного влияния (ЗЛВ) проводили металлографический анализ. Целью исследования было, определение характера влияния лазерного раскроя на структуру металла.

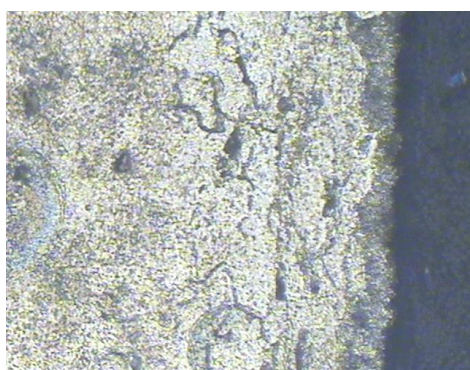
На рисунках 1 – 3 представлены микроструктуры алюминиевых сплавов после лазерного раскроя ($\times 400$).



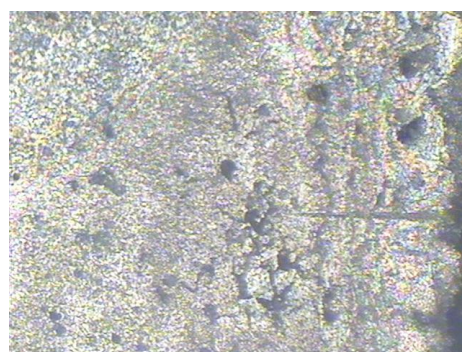
а)



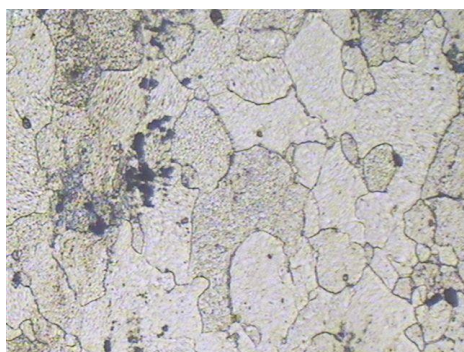
б)



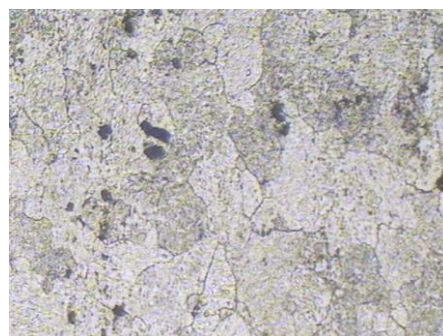
в)



г)

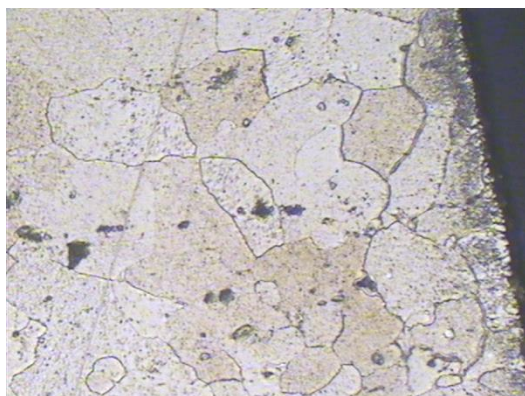


д)

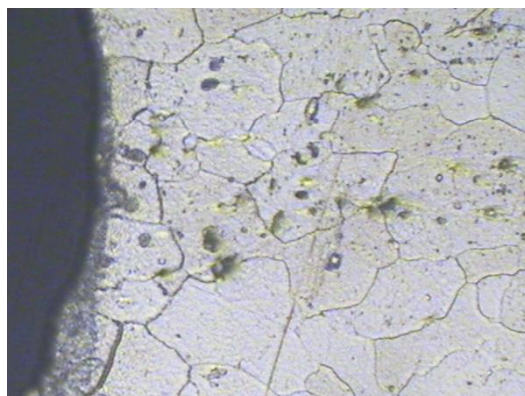


е)

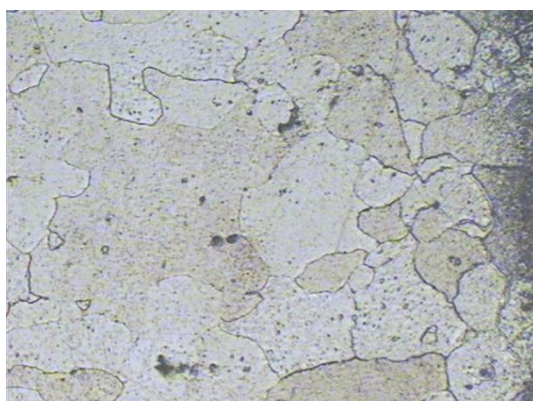
Рисунок 1 – Структуры сплава 1163АТ толщиной 2,0 мм (сторона выхода лазерного луча): а, б, в, г – зона термического влияния; д, е – зона основного металла



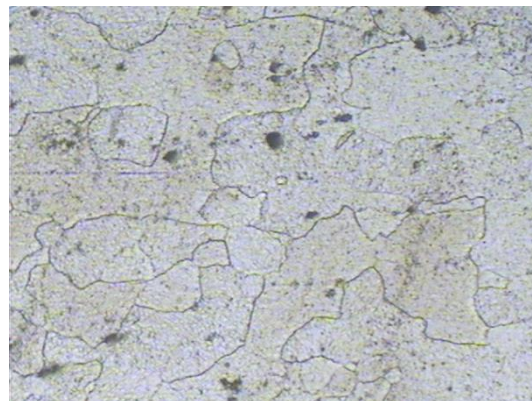
а)



б)

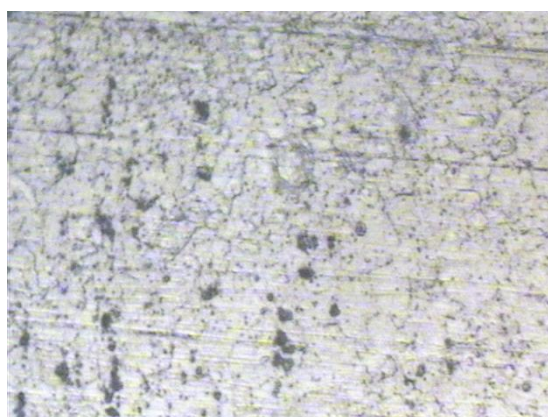


в)

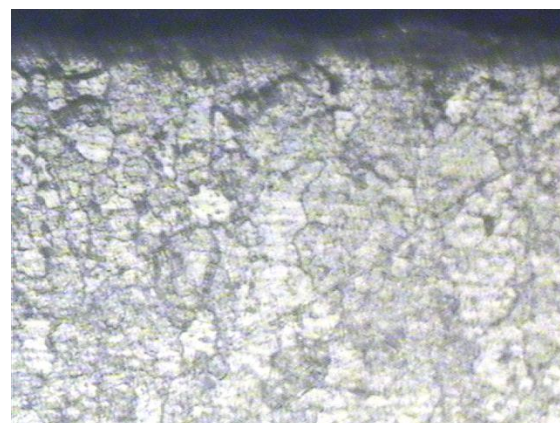


г)

Рисунок 2 – Структуры сплава 1163АТ толщиной 4,0 мм (сторона выхода лазерного луча): а, б, – зона термического влияния; в, г – зона основного металла



а)



б)

Рисунок 3 – Структуры сплава 1163АТ толщиной 1,2 мм (сторона выхода лазерного луча): а – зона термического влияния; б – зона основного металла

В основе метода лазерной резки лежит тепловое воздействие теплового луча высокой концентрации. В результате, под воздействием лазера тепловой обработке подвергается небольшой участок металлической поверхности.

Лазерный луч не оставляет после себя производственных отходов, обеспечивая одновременно экономию материала и высокое качество реза.

Качество кромок деталей после резки, сопоставимое с качеством после механической обработки, на порядок выше, чем после известных процессов термической резки. Скорости лазерной резки достигают $\geq 0,167$ м/с.

В большинстве случаев применений, процесс является малоотходным, обеспечивает получение готовых деталей, практически не подвергнутых деформациям и не требующих последующей термомеханической обработки.

Газолазерная резка металлов имеет достаточно много общего с другими термическими способами резки. Качество газолазерной резки определяется следующими показателями: точностью, шероховатостью, перпендикулярностью (клиновидностью), протяженностью зоны термического влияния, шириной реза, отставанием линии реза, количеством грат (наплывы на нижней кромке разрезаемого металла), а также радиусом оплавления верхней кромки.

При ГЛР металлов на поверхности реза образуются углубления (бороздки), расположенные равномерно одно за другим. Бороздки характеризуются тремя показателями: глубиной, частотой и формой (искривлением или так называемым отставанием линии реза), которые в своей совокупности определяют микрогеометрию (шероховатость) поверхности реза.

Эти бороздки выполняют функцию концентраторов напряжения, влияющих на усталостную прочность металлов. Шероховатость металла зависит от тепловых характеристик источника теплоты, параметров струи газа и погрешности устройства перемещения.

Структурные изменения при лазерном воздействии определяются абсолютным значением и градиентом температуры, скоростью нагрева и охлаждения. Для лазерной обработки, характерно развитие динамических температурных полей с высокими градиентными соотношениями, скоростями нагрева и охлаждения.

При взаимодействии лазерного излучения с материалами активизируются диффузионные, химические, термопластические процессы. Они приводят к росту плотности дислокаций и других дефектов кристаллического строения, развитию закалочных структур, формированию полей остаточных напряжений, выделению или растворению избыточных фаз и другим процессам структурообразования.

Поверхностные структуры, образованные лазерным упрочнением, характеризуются высокой степенью неравновесности и отличаются повышенной твердостью, которую невозможно получить методами традиционной термообработки. При газолазерной резке металлов в струе кислорода, последний способствует росту окисной пленки на поверхности металла и в результате снижения его отражательной способности. Использование современных технологий позволяет сохранять первичные свойства металла.

Охлаждение зоны обработки при термической резке позволяет избежать оплавления или коробления детали. Использование среды защитных газов позволяет предотвратить взаимодействие химически активного алюминия при высокой температуре с воздушной средой.

Лазерный раскрой является современным высокотехнологичным способом, особенно актуальным в производствах с повышенными требованиями к качеству реза, не требующим дополнительной доработки. При лазерной обработке металла заготовка не деформируется, не изгибается, а с помощью дополнительной полировки можно убрать любые мельчайшие дефекты. Раскрой металла производится при помощи воздействия

узконаправленного монохроматического луча, сгенерированного лазерным резонатором.

Луч, концентрируясь на очень маленькой площади, создает большую энергию, которая приводит к расплавлению обрабатываемого материала строго по линии реза.

Так как область термического воздействия очень мала, то, соответственно, расход материала незначительный и вероятность возникновения дефектов (вмятин, заусенцев, окалин) сводится к минимуму. Можно резать как по сложному контуру, так и по острому углу.

Микроанализом установлено, что микроструктура алюминиевого, упрочняемого сплава 1163АТ равномерна, соответствует отожженному состоянию. Изменений в зоне лазерной резки ни по микроструктуре, ни по микротвердости не обнаружено.

Микроструктура и микротвердость алюминиевых сплавов 1163АТ в отожженном состоянии в поверхностных слоях после лазерных резки изменений не претерпевают. При раскрое лазерным лучом всех исследуемых материалов на поверхности, в зоне реза со стороны выхода луча образуются заусенцы высотой до 0,2 мм.

Данные по микротвердости образца представлены в таблице 1.

Таблице 1 –Значение микротвердости, HV.

Глубина от линии реза, мкм	Значение микротвердости, HV
65	72,7
131	75,6
211	57,3
291	70,5
361	66,6
386	73
511	68,7
511	75,1
1025	75,4
1025	58
1311	64,7
1311	73,9

Продолжение Таблицы 1.

1311	66,6
1391	58
1391	57,1
1591	73,8
1591	74,6
1591	72
1591	65
2231	69,3
3241	63,4
4328	61

На рисунке 4 представлено влияние глубины от линии реза на микротвердость сплава 1163АТ.

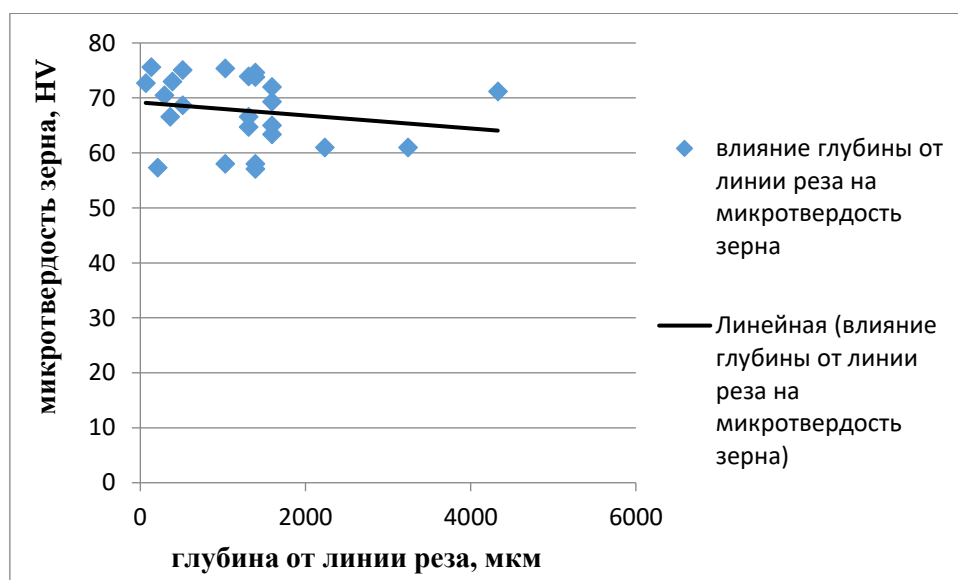


Рисунок 4 - Влияние глубины от линии реза на микротвердость сплава 1163АТ

На основе полученных данных можно сделать вывод, что при обработке деталей резанием под действием прикладываемых усилий в металле поверхностного слоя происходит пластическая деформация, изменяющая его механические и физические свойства. Совокупность явлений, сопровождающих процесс пластической деформации поликристаллов, вызывает общее упрочнение (наклеп) деформируемого металла, характеризующегося обычно микротвердостью. Из графика на рисунке 21

можно сделать вывод, что при увеличении глубины от линии реза, микротвердость сплава 1163АТ уменьшается.

Металлографические и фрактографические исследования показали, что рельеф поверхности реза и толщина разрезаемого металла мало зависят от марки сплава, определяется в основном режимами резки.

Высокие значения температур нагрева металла в зоне обработки приводят к существенным изменениям структуры металла зоны термического влияния. За поверхностью реза следует литая зона, за ней зона рекристаллизации, которая характеризуется пережогом по границам зерен.

Это приводит к образованию отдельных продольных и поперечных трещин при резке алюминиевых сплавов с кислородом (рисунок 5). У сплавов меньшей толщины глубина опасной зоны уменьшается, так для толщин образцов 1,5 мм не превышает 0,1 мм.

При резке алюминиевых сплавов с азотом качество поверхности кромок реза улучшается, трещины отсутствуют, глубина зоны термического влияния уменьшается



Рисунок 5 - Наличие трещин на поверхности реза алюминиевого сплава при лазерной резке

Исследования распределения легирующих примесей в зоне термического влияния у поверхности реза показали, что не наблюдается их выгорание, ликвация.

Таким образом, при газолазерная резка зависимо от мощности выбранного оборудования, можно разделять листы большой толщины, исключается механическое повреждения материала, так как резка металла лазером выполняется без соприкосновения рабочей части с поверхностью изделия, высокая скорость проведения технологического процесса, выделение минимального количества отходов, возможность создавать резы разных размеров, формы.

Вследствие протекания при ГЛР тепловых и физико-химических процессов в зоне термического влияния (ЗТВ) происходит изменение фазового и химического состава металла.

Структура сплава 1163АТ состоит из α - твердого раствора легирующих элементов в алюминии, S-фазы (Al_2CuMg), более темной Т-фазы ($\text{Al}_2\text{Zn}_2\text{Mg}_3$) расположенной по границам зерен. В данной системе возможно выделение Т-фазы (CuMg_4Al_6), однако содержание меди и магния в промышленных сплавах Al таково, что Т-фаза не выделяется (рисунки 6 и рисунок 7).

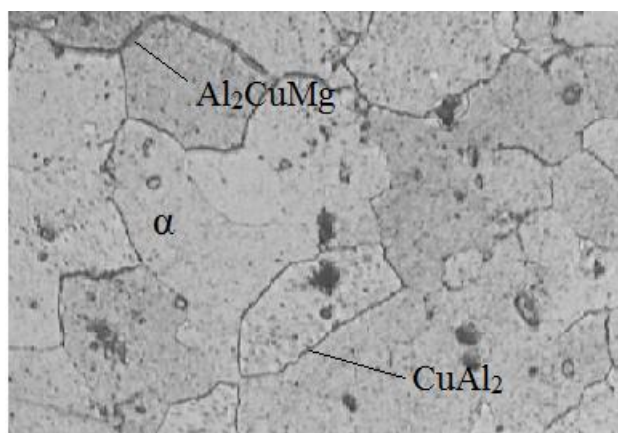


Рисунок 6 - Фазовый состав сплава 1163АТ после ГЛР

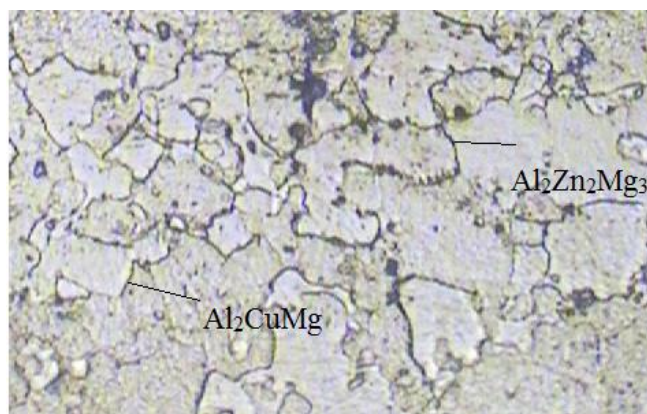


Рисунок 7 - Фазовый состав сплава 1163АТ после ГЛР

Структура данных сплавов представляет собой твердый раствор с выделением метастабильных фаз: зон Гинье-Престона или метастабильной вторичной фазы, имеющей когерентную связь с твердым раствором.

Поэтому при лазерном раскрое предварительно упрочненных термической обработкой деформируемых сплавов происходит растворение метастабильных образований, а после быстрого охлаждения фиксируется структура пересыщенного твердого раствора. Поскольку содержание легирующего компонента в этих сплавах невелико, то степень пересыщения не очень большая и твердость по сравнению с твердостью в исходном упрочненном состоянии снижается.

Дисперсность структуры зависит от режимов лазерной. Увеличение скорости лазерного раскроя приводит к измельчению структуры.

Численный анализ размеров среднего зерна в зоне ГЛВ проводился программой Image - PRO Plus версии 5.1.

Сводные данные сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - Сводные данные

Материал	Толщина, мм	Скорость реза, мм/мин	Площадь зерна $S_{\text{ср}}$, мкм	Твердость, HV
1163AT	2	1500	0,25	62,4
1163AT	2	2000	0,10	74
1163AT	2	3000	0,094	84,2
1163AT	2	3500	0,09	92,2
1163AT	2	4500	0,05	105,3

На рисунках (8 – 9) представлены влияние скорости реза на площадь зерна и твердость материала.

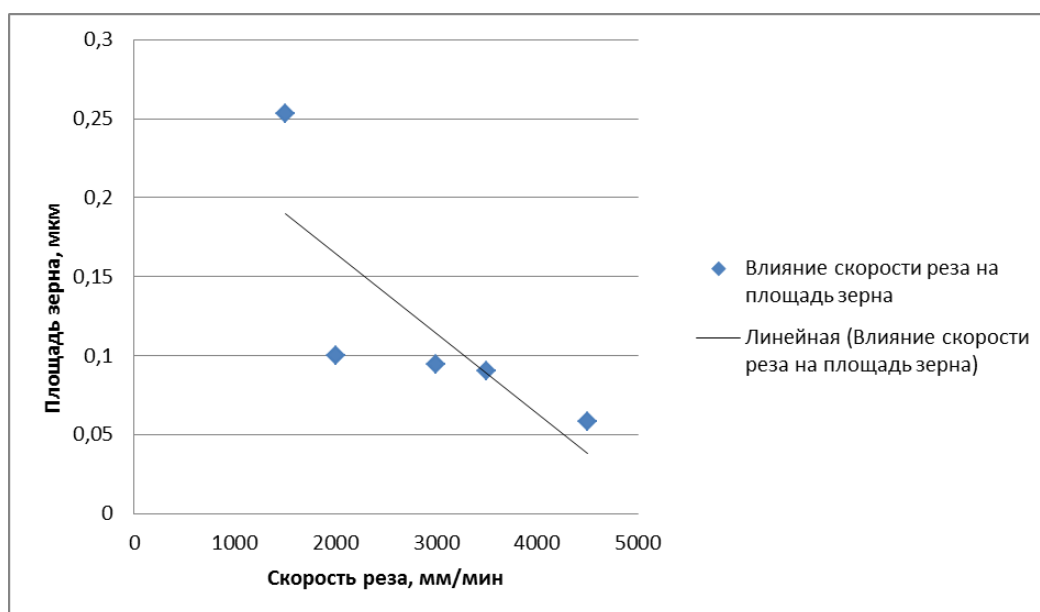


Рисунок 8 – Влияние скорости реза на площадь зерна для сплава 1163AT

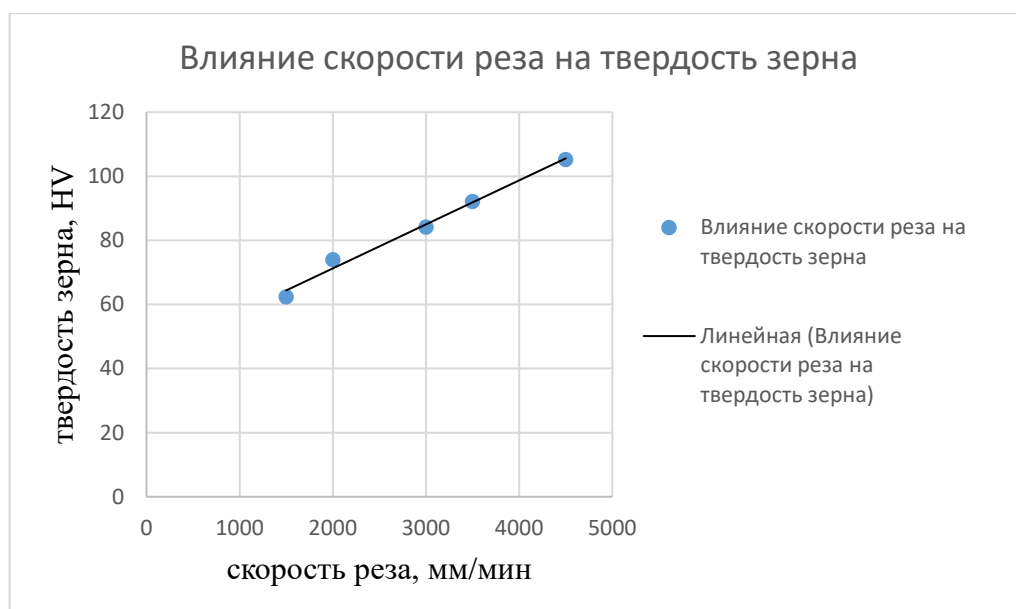


Рисунок 9 – Влияние скорости реза на твердость сплава 1163АТ

В сплаве 1163АТ в зоне реза образуются поры, трещины, внутренние напряжения и другие дефекты. Зерна у самой кромки реза имеют более четкие очертания, чем в зоне основного металла.

Мелкозернистая структура образуется в результате оплавления металла. Размер зерна, формирующейся структуры на порядок меньше, чем основного металла. Толщина границ в зоне реза более четкая. Так как измельчается структура зерна, то это приводит к увеличению твердости, что представлено на графике (рисунок 9).

На рисунке 10 для наглядности представлены панорамы сплавов с зоной перехода термического влияния в зону основного металла. В зоне основного металла видно, что границы зерен протравливаются слабо, по границам зерен и внутри присутствуют интерметаллидные частицы (играющие роль упрочнителя): CuAl_2 , Al_2CuMg для сплава 1163АТ.

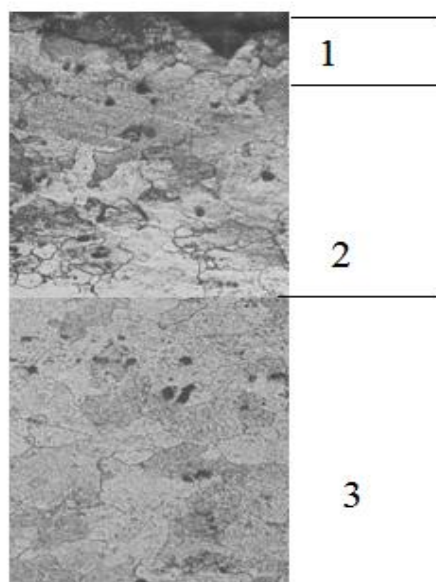


Рисунок 10 - Панорама микроструктуры сплава 1163АТ,
1 - мелкозернистая структура, 2 - зона оплавления границ, 3 - зона
основного металла

Так как данный сплав представляют собой α - твердый раствор с различными включениями стабильных вторичных фаз, то при лазерной закалке можно получить пересыщенный твердый раствор. При этом вследствие пересыщения твердого раствора, измельчения структуры и увеличения дефектности кристаллического строения достигается небольшое упрочнение. Так как содержание легирующих компонентов в данном сплаве невелико, то степень пересыщения не очень большая и твердость в зоне оплавления по сравнению с твердостью в исходном упрочненном состоянии снижается.

Заключение

Проведенный анализ показал, что при высоких скоростях раскря поверхность реза имеет мелкозернистую структуру. При низких скоростях происходит увеличение размера зерна. С точки зрения свойств материала мелкозернистая структура предпочтительней, так как повышается прочность и усталостные характеристики.

Отличительной особенностью строения ЗЛВ алюминиевых сплавов является то, что у них четко выделяется зона мелкозернистой структуры и зона оплавления порядка 30 мкм. Оплавление границ зерен происходит преимущественно в направлении глубины образца.

Главным преимуществом газолазерной резки является то, что нет воздействия на металл механически. Деформации находятся на минимальном уровне, скорость резки довольно велика. А еще высокая точность помогает делать наиболее сложные детали. Лазерная резка не ограничивает работу с деталями. Могут подойти как плоские детали, так и объемные. Именно благодаря всем этим преимуществам лазерный метод работы является сейчас ведущим. Лазерные технологии являются наиболее прогрессивными и довольно широко внедряемыми в авиационной промышленности.

В целом применение данных технологий обработки материалов, использующихся в аэрокосмическом секторе – от разнообразных жаропрочных сплавов до слоистых материалов позволяет при заданном качестве повысить ресурс, оптимизировать производственный процесс, сократить трудоемкость, увеличить производительность. Теория и практика лазерной обработки материалов подтверждает огромные возможности лазерных технологических процессов, которые позволяют эффективно решать крупные производственные задачи.

В ходе работы поставленная цель исследования исследование влияния газолазерной резки на структуру и свойства алюминиевых сплавов, определение глубины и характера влияния лазерного раскроя на структуру металла с применение металлографического исследования была достигнута.