

На правах рукописи

Май Суан Зунг

**УЛУЧШЕНИЕ КОМПЛЕКСА СВОЙСТВ ТЕРМИЧЕСКИ
УПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ
КРИОГЕННОЙ ОБРАБОТКИ И ТЕРМОУДАРОМ**

Специальность: 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Пучков Юрий Александрович**
кандидат технических наук, доцент кафедры
материаловедения МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Лаптев Анатолий Борисович**
доктор технических наук, главный научный
сотрудник ФГУП «Всероссийский научно-
исследовательский институт авиационных
материалов» (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ)

Поздняков Андрей Владимирович
кандидат технических наук, доцент кафедры
металловедения цветных металлов НИТУ
«Московский институт стали и сплавов» (НИТУ
«МИСиС»)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»
ФГБОУ ВО «МАИ»

Защита состоится «__» _____ 2021 г. в ____ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.141.04 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные
печатью, просьба высылать по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5,
стр. 1 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Телефон для справок: 8(499) 267-09-63.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент



Плохих Андрей Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Закалка и старение, а также термомеханическая обработка значительно повышают конструкционную прочность термически упрочняемых алюминиевых сплавов, однако эти процессы сопровождаются появлением часто нежелательных остаточных напряжений.

Остаточные напряжения вызывают коробление, растрескивание, размерную нестабильность, усталостное разрушение, разрушение покрытий, снижают предел прочности; вызывают необходимость увеличения припусков и объема механической обработки, а в ряде случаев приводят к браку. Для снижения закалочных остаточных напряжений увеличивают температуру используемой в качестве охлаждающей среды воды и применяют полимерные закалочные среды. Однако для снижения до требуемого уровня остаточных напряжений в ряде случаев этого оказывается недостаточно. По научно-техническим литературным данным компании Newton Heat Treating, Bell helicopters (США), наряду с традиционными методами, снижают остаточные напряжения в сложных по геометрической форме изделиях из термически упрочняемых алюминиевых сплавов, применяя восходящую закалку (uphill quenching), заключающуюся в охлаждении закаленной заготовки до криогенной температуры и быстром нагреве (термоударе) до температуры старения в кипящей воде или водяном паре высокого давления.

Рядом отечественных ученых И.И. Сидориным, И.Н. Фридляндером, В.И. Добаткиным, И.Ф. Колобневым, В.В. Захаровым, Л.Б. Бером и др. выполнены фундаментальные исследования влияния закалки, старения и пластической деформации на структуру и свойства алюминиевых сплавов. Данные по влиянию восходящей закалки на структуру и свойства этих сплавов приведены в публикациях иностранных ученых: Краучера, Ванга, Хилла, Йошихара и др.

С теоретической точки зрения остается открытым вопрос о влиянии восходящей закалки на структуру термически упрочняемых алюминиевых сплавов и о механизмах влияния получаемой структуры на свойства этих сплавов. Недостаточно полно экспериментально исследовано влияние режимов восходящей закалки на механические и коррозионные свойства сплавов. Для сокращения времени промышленного внедрения этого процесса для сложных по геометрической форме изделий требуется разработка расчетно-методической базы для применения CAD/CAM технологий.

Таким образом, разработка режимов криогенной обработки и термоудара термически упрочняемых алюминиевых сплавов с пониженным уровнем остаточных напряжений, механическими, коррозионными и технологическими характеристиками не менее требований ГОСТ, представляют собой актуальную задачу.

Целью работы является повышение комплекса свойств изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов с пониженным уровнем остаточных напряжений на основе применения криогенной обработки с последующим термоударом (КОТУ).

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. С использованием научно-технических литературных данных проанализировать влияние КОТУ на структуру, свойства и остаточные напряжения в изделиях из термически упрочняемых алюминиевых сплавов.
2. Подготовить базу данных и выполнить математическое моделирование с целью выбора режимов КОТУ и технологической среды для термоудара.
3. Расчетным и экспериментальными методами определить влияние режимов КОТУ на величину остаточных напряжений.
4. Установить закономерности влияния КОТУ на микро- и тонкую структуру, механические и коррозионные свойства выбранного термически упрочняемого сплава.

Объектами исследования являются деформируемые термически упрочняемые алюминиевые сплавы Д16 и В-1341.

Предметом исследования является влияние КОТУ на остаточные закалочные напряжения, эксплуатационные и технологические свойства термически упрочняемых алюминиевых сплавов.

Научная новизна:

1. Установлено, что криогенная обработка и термоудар (КОТУ) увеличивают дисперсность, плотность и однородность по размерам выделений упрочняющей фазы, снижают размеры областей когерентного рассеивания. Указанные структурные изменения позволяют получить значения пределов текучести и прочности, соответствующие требованиям ГОСТ 1497–84, увеличить пластичность, твердость, стойкость к абразивному изнашиванию от 10 до 30 %, стойкость к общей коррозии – на 40 %.

2. КОТУ подавляет образование зон свободных от выделений на границах зерен, приводит к образованию на границах зерен обособленных мелкодисперсных выделений, что позволяет увеличить стойкость к межкристаллитной коррозии на 34 %.

3. Проведение КОТУ вызывает снижение остаточных напряжений до 71 %, позволяя снизить отклонение от круглости при механической обработке трубчатых заготовок на 55 %.

4. Определена зависимость коэффициента теплоотдачи жидкого азота в интервале температур от +20 до -196 °С.

Достоверность результатов работы обеспечена согласованностью экспериментальных результатов, полученных с использованием разнообразных методов исследования структуры, фазового состава и свойств изучаемых сплавов, сертифицированного аналитического и испытательного оборудования и подтверждена результатами статистической обработки результатов экспериментов.

Практическая значимость работы:

1. Результаты работы внедрены в опытном производстве Академии технологий (г. Ханой, Вьетнам), что позволило снизить продолжительность технологической подготовки производства, объем механической обработки и брака, а также улучшить эксплуатационные свойства изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов.

2. Результаты работы и изготовленное оборудование для определения остаточных напряжений методом сверления приняты для использования в учебном процессе обучения бакалавров и выполнения профильных квалификационных работ.

Положения, выносимые на защиту:

Методика и база данных для расчета остаточных напряжений и выбора режимов и сред для закалки, криогенной обработки и термоудара изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов.

2. Результаты определения коэффициента теплоотдачи жидкого азота при температурах от +20 до -196 °С.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния КОТУ на остаточные напряжения в образцах из сплава Д16.

. Результаты экспериментальных исследований и закономерности влияния КОТУ на структуру, механические и коррозионные свойства, а также стойкость к абразивному изнашиванию и точность обработки образцов из сплава Д16.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы неоднократно доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, на XII и XIII Всероссийских конференциях молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2019 и 2020 гг.; Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2020» (ICMTMTE 2020), Севастополь, 2020 г.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в научных работах, в том числе: в 5 научных статьях, 4 из которых опубликованы в журналах из перечня ВАК РФ, и 1 – в издании, индексируемом в Scopus, общим объемом 3,5 п. л./2 п. л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 135 наименований. Работа изложена на 140 страницах, содержит 76 рисунков и 23 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении излагается обоснование выбора и актуальности темы диссертационной работы, формулируются цель, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен аналитический обзор научно-технических литературных данных о применяющихся в настоящее время термически упрочняемых алюминиевых сплавах и влиянии термической обработки на их механические, коррозионные свойства и остаточные напряжения. Рассмотрено влияние диффузионного отжига, горячей пластической деформации, закалки, термомеханической обработки и старения на структуру и свойства термически упрочняемых алюминиевых сплавов. Показано влияние остаточных напряжений на эксплуатационные и технологические свойства изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов. Рассмотрены экспериментальные методы определения и снижения остаточных напряжений в

металлоизделиях. Показана также актуальность внедрения криогенной обработки и термоудара. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе приведены материалы, методики проведения исследований и испытаний. Объектом исследований являлись изготовленные из круглого проката диаметром 60 мм и плиты толщиной 25 мм из сплава Д16 кольцевые образцы с внешним диаметром 60 мм, внутренним диаметром 40 мм, шириной 10 мм; образцы в форме прямоугольного параллелепипеда 100×30×25; а также изготовленные по ГОСТ 1497–84 разрывные цилиндрические образцы типа VII с диаметром рабочей части 6 мм. Химический состав сплава определен на атомно-эмиссионном спектрометре с лазерным возбуждением (ЛАЭС) (Таблица 1). Зернистая структура проката в состоянии поставки исследована металлографическим методом.

Таблица 1

Химический состав образцов из исследованного сплава Д16

Сплав	Содержание элементов, % (по масле)								
	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cr	Ti	Al
Д16	4,35	1,50	0,60	0,50	0,50	0,10	0,16	0,07	Основа

Для поддержания температуры в солевой и масляной ваннах использовали аттестованные хромель-копелевые термопары и микропроцессорный измеритель-регулятор температуры 2ТРМ1-Щ2.У.РР. В качестве рабочей среды солевой ванны выбрана смесь солей: 55 % NaNO_3 + масляной ванны – индустриальное масло марки 20. Для выравнивания температуры внутри ванн их содержимое во время выдержек в них образцов тщательно перемешивали. С целью закалки образцы нагревали в солевой ванне до 495 ± 2 °С, выдерживали в ней 20 мин, а затем охлаждали в воде с температурой 40 ± 1 °С и выдерживали в ней 5 мин. После закалки образцы подвергали КОТУ: охлаждали до -196 °С в жидком азоте и выдерживали в нем 5 мин кольцевые и 15 мин прямоугольные образцы, а затем нагревали их в минеральном масле с температурой 175 ± 2 °С. Естественное старение продолжительностью 100 ч проводили при комнатной температуре, а искусственное старение – при 190 °С в течение 12 ч проводили в камерной печи BINDER ED-23. Графики режимов термообработки приведены на Рис. 1.

Остаточные макронапряжения в образцах определяли методом сверления по стандарту ASTM E837-08, а микронапряжения - методом Шеррера.

Микротвердость образцов измеряли на твердомере EMCO-TEST Durascan 20 по методу Виккерса с нагрузкой 100 г и выдержкой 10 с в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507–1–2007.

Удельную электрическую проводимость поверхностной зоны образцов определяли вихретоковым измерителем ВЭ-27НЦ.

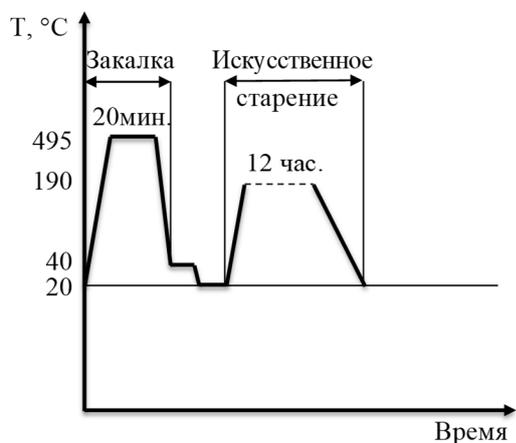
Испытания на разрыв выполняли по ГОСТ 1497–84 (Методы испытаний на растяжение) на разрывной машине Z100 производства фирмы Zwick/Roell. Расчет основных характеристик проводили автоматизировано с помощью штатной программы сбора и обработки данных.



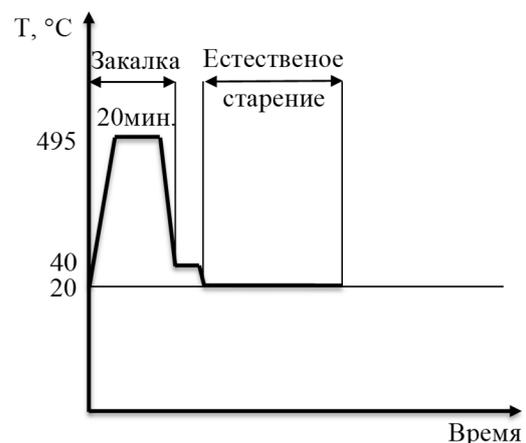
Закалка+ КОТУ+искусственное старение
(1-ый режим)



Закалка+ КОТУ+естественное старение
(2-ой режим)



Закалка+ искусственное старение
(3-ий режим)



Закалка+ естественное старение
(4-ый режим)

Рис. 1. Схемы термообработки кольцевых образцов из сплава Д16

Структурные исследования проводили с помощью светового микроскопа Olympus GX51, электронного сканирующего микроскопа TESCAN VEGA 2 LMN и электронного просвечивающего микроскопа JEM-2000 EX.

Расчет температурного поля и остаточных напряжений проводили с использованием программного комплекса Ansys.

Коррозионные исследования выполнены потенциодинамическим методом на потенциостате IPC Pro MF, методом электрохимической импедансной спектроскопии с помощью анализатора частотного отклика FRA2, а также методом акустической эмиссии с помощью прибора «Поиск». Скорость общей и питтинговой коррозии определены методом поляризационного сопротивления по стандарту ASTM G102 с использованием коррозиметра «Эксперт-004».

Стойкость к абразивному износу определена по методу испытания на истирание шлифовальной шкуркой по ГОСТ 11012–2017 на испытательном стенде ММ-ИП.

В третьей главе изложена методика и результаты расчета влияния КОТУ на остаточные макронапряжения, дано описание изготовленной установки и результаты определения остаточных макронапряжений методом сверления. Для

определения остаточных напряжений в процессе термообработки использован конечно-элементный программный комплекс Ansys. Моделирование тепловых процессов выполнено на основе уравнения теплопередачи и граничного условия третьего рода.

Расчет температурного поля выполняли с использованием анализа – «Transient Thermal», а определение остаточных напряжений и деформаций - с использованием анализа – «Static Structural», при моделировании в котором использован критерий Мизеса, определяющий переход металла из упругого состояния в пластичное:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)},$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентное напряжение.

Данный расчет предполагает, что пластическое течение начинается, когда эквивалентное напряжение превышает предел текучести, определенный при испытании на растяжение, а в материале непрерывно происходят термоупругопластические процессы, сопровождаемые процессом нелинейного изменения характеристик материала.

Для расчета подготовлена база данных, включающая зависимости напряжений от степени деформации для комнатной температуры, и температурах -196 и +495 °С; данные о коэффициентах теплопроводности, температурного расширения, теплоемкости, а также модуля упругости, коэффициентах теплоотдачи воды, водяного пара и минерального масла. Экспериментально определена зависимость коэффициента теплоотдачи жидкого азота от температуры (Рис. 2). Для его определения использован датчик Д.В. Будрина. Наибольшие значения коэффициента теплоотдачи жидкого азота наблюдаются на начальном и завершающем этапе охлаждения, когда преобладает пузырьковый режим охлаждения. Сравнительно низкие значения коэффициента теплоотдачи – в интервале температур от -5 до -60 °С, когда режим охлаждения пленочный.

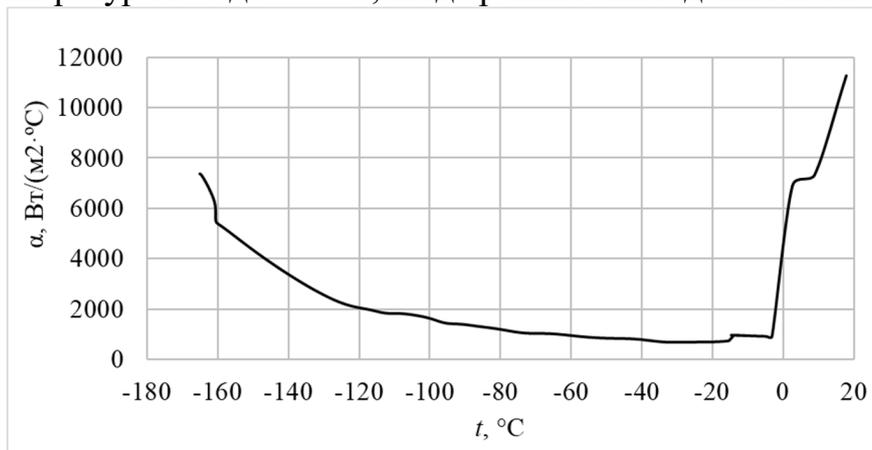


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи жидкого азота от температуры охлаждаемой поверхности

Расчетным методом показано, что применение после закалки охлаждения в жидком азоте до -196 °С, и нагрева при термоударе в кипящей воде, водяном паре высокого давления, минеральном масле до температуры 175 °С уменьшает

остаточные напряжения в образцах из сплава Д16. В отличие от пара высокого давления применение минерального масла не требует использования специального оборудования. В результате моделирования определена продолжительность охлаждения в жидком азоте до температуры $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, рассчитаны поля остаточных напряжений после закалки, криогенной обработки и термоудара: в кипящей воде, паре высокого давления и минеральном масле с температурой $175\text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве среды для термоудара выбрано индустриальное масло марки 20.

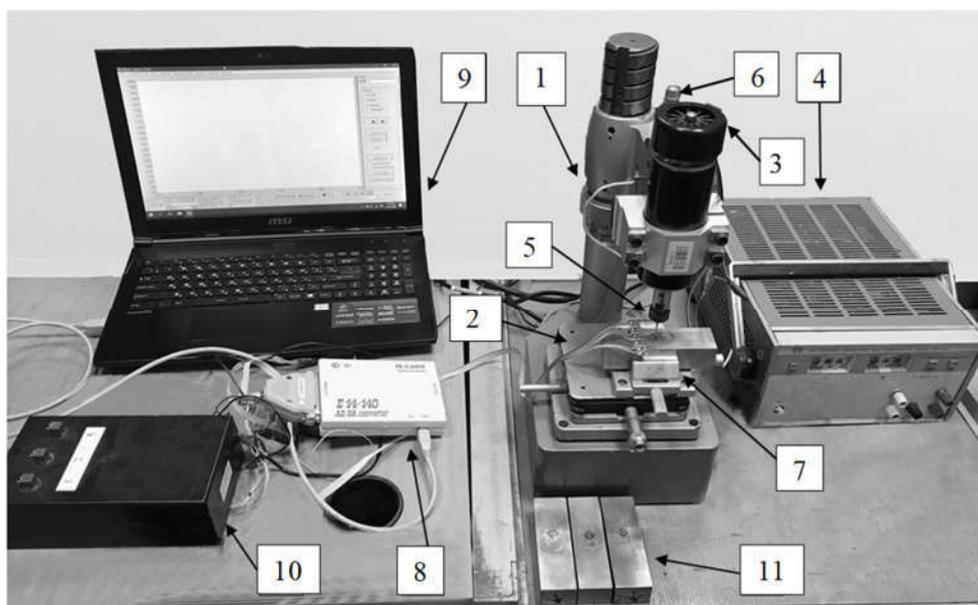


Рис. 3. Установка для определения остаточных напряжений методом сверления
 1 – штатив; 2 – предметный столик; 3 – высокоскоростной электродвигатель сверлильного устройства; 4 – источник питания постоянного тока Б5-47; 5 – патрон с концевой фрезой; 6 – микрометрический винт для вертикального опускания сверлильного устройства; 7 – тиски и закрепленный в них образец; 8 – АЦП Е14-140; 9 – ноутбук; 10 – приборная коробка;
 – прямоугольные образцы с наклеенными тензодатчиками

Основными частями установки, изготовленной для определения остаточных напряжений методом сверления (Рис. 3), являются: штатив (1), предметный столик (2), электродвигатель (3) со скоростью вращения от 3000 до 12000 об/мин, регулируемой с помощью источника питания постоянного тока Б5-47 (4). На выходном валу электродвигателя закреплен патрон для концевой фрезы (5). Штатив состоит из основания и колонки, имеющей ленточную резьбу для перемещения в вертикальном направлении кронштейна с электродвигателем. На кронштейне размещен прецизионный ходовой винт (6), с помощью которого можно перемещать вниз электродвигатель.

Прибор позволяет высверливать отверстия, концентрично выровненные с кругом тензодатчика. К предметному столику крепятся тиски (7), в которых закрепляют изделие. Верхнюю часть столика можно перемещать в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью микрометрических винтов. Применяемые для испытаний тензодатчики содержат три единичных

или парных сеток тензорезистеров, которые располагаются по круговой модели и равноудалены от центра тензодатчика.

В процессе высверливания отверстия происходит разбалансировка трех мостов, каждый из которых состоит из тензорезистера, двух эталонных и одного подстроечного сопротивлений, по номиналу близких к сопротивлению тензорезистера. Для записи величин выходных напряжений использована АЦП E14-140 (8) и ноутбук (9), оснащенный программой для самописца LGraph2. Перед записью напряжений, возникающих при высверливании отверстия, мосты уравнивали с помощью подстроечных сопротивлений. Напряжение на входе мостов получали, используя батарею из гальванических элементов. Эталонные и подстроечные сопротивления, а также усилители выходных напряжений мостов Уитстона вмонтированы в плату приборной панели (10). Под пунктом (11) показаны прямоугольные образцы с наклеенными тензодатчиками.

Для расчета напряжений использовали программу Excel и приведенные в стандарте ASTM E837-13a математические уравнения, полученные на основе теории линейной упругости.

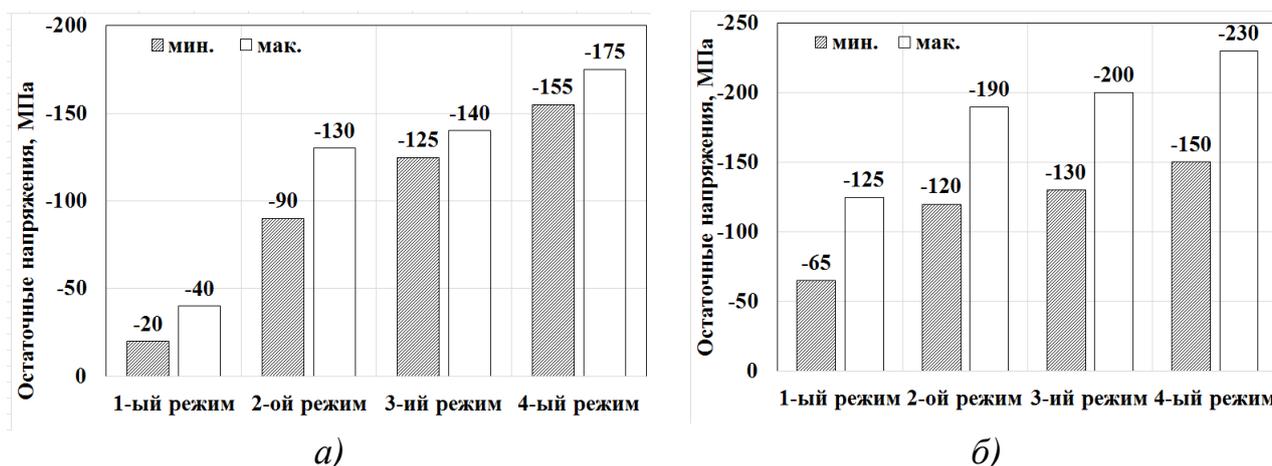


Рис. 4. Минимальные и максимальные остаточные напряжения в кольцевых (а) и прямоугольных (б) образцах, термообработанных по режимам, приведенным на Рис. 1.

На Рис. 4 приведены результаты исследования методом сверления отверстия остаточных напряжений в кольцевых (Рис. 4, а) и прямоугольных (Рис. 4, б) образцах, термообработанных по режимам, приведенным на Рис. 1. Применение КОТУ перед старением (Рис. 1) уменьшает: в кольцевых образцах максимальные остаточные напряжения после естественного старения со 175 до 130 МПа, т. е. на 26 %, а после искусственного старения со 140 до 40 МПа, т. е. на 71 %; в прямоугольных образцах с размерами 100×30×25 – после естественного старения со 230 до 190 МПа, т. е. на 17 %, а после искусственного старения с 200 до 125 МПа, т. е. на 38 %.

Используя отражения от кристаллографических плоскостей (HKL) (111) и (222), по методу Шеррера определены средний размер блока, микродеформация и микронапряжение. Полагали, что блоки имеют сферическую форму. Расчётными методами по дифрактограммам, снятым в излучении CoK_{α} – с помощью компьютерного моделирования, определили средний диаметр

сферического блока D (нм) и среднеквадратичную микродеформацию ε (%) в направлении по нормали к плоскости (111). Зная величину микродеформации и используя обобщенный закон Гука для случая одноосного растяжения/сжатия, определили величину микронапряжений σ (МПа). Применение КОТУ снижает средний диаметр блока и микронапряжения (Таблица 2).

Таблица 2

Влияние КОТУ на диаметр блоков, микродеформацию и микронапряжение в поверхностной зоне прямоугольных образцов с размерами 100x30x25 мм

Термическая обработка	Средний диаметр блока D , нм	Среднеквадратичная микродеформация ε , %	Микронапряжение σ , МПа
КОТУ искусственное старение	70,2±4,0	0,1056±0,0136	55,94±10
Закалка искусственное старение	87,8±11,2	0,1383±0,0171	99,58±12

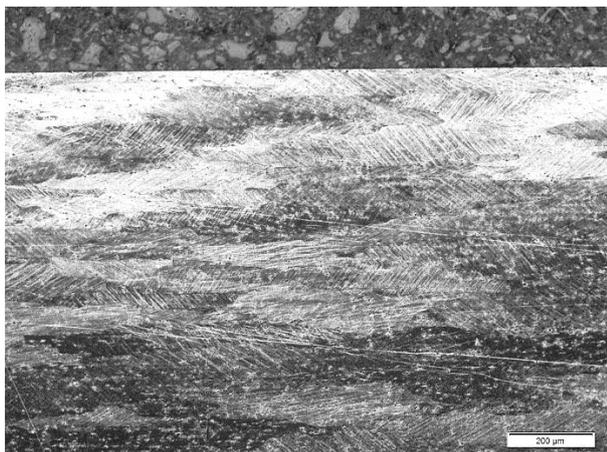
В четвертой главе исследовано влияния КОТУ на микроструктуру и свойства сплава Д16.

Методом световой микроскопии в поверхностной зоне прямоугольных образцов обнаружены полосы скольжения, образовавшиеся при закалке и термоударе (Рис. 5). С применением просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), показано, что применение КОТУ приводит к изменению субмикроструктуры, что объясняется образованием дислокаций не только при пластической деформации, сопровождающей закалку, но и при термоударе. При старении эти дислокации являются местами зарождения речных выделений упрочняющей S' -фазы.

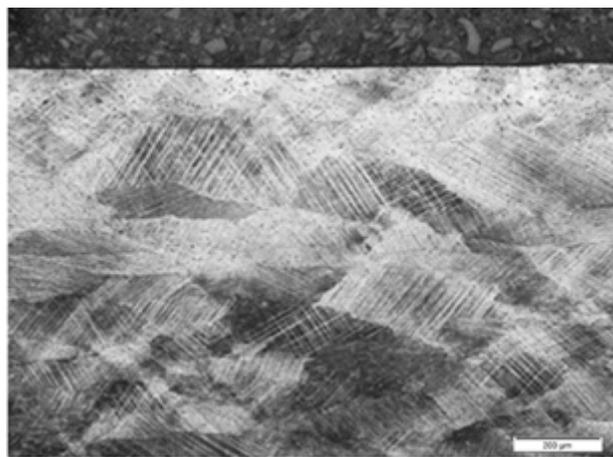
ПЭМ установлено, что применение КОТУ позволяет получить более короткие и более равномерно распределенные по длине включения упрочняющей S' -фазы (Рис. 6) После КОТУ отсутствует приводящая к снижению прочности зона свободная от выделений, наблюдается более высокая плотность винтовых дислокаций, что является отличительной особенностью сплава пластически деформированного при криогенной обработке.

Методами сканирующей микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа показано, что в сплаве Д16, как без, так и с применением КОТУ содержатся фазы, кристаллизационного происхождения: округлые выделения S -фазы и вытянутые включения, содержащие алюминий, медь и марганец (T -фазы). С применением рентгеноструктурного анализа, установлено, что помимо перечисленных фаз в сплаве также присутствуют θ - и θ' -фазы, а также фаза $Al_5Mg_3Cu_2Si_6$.

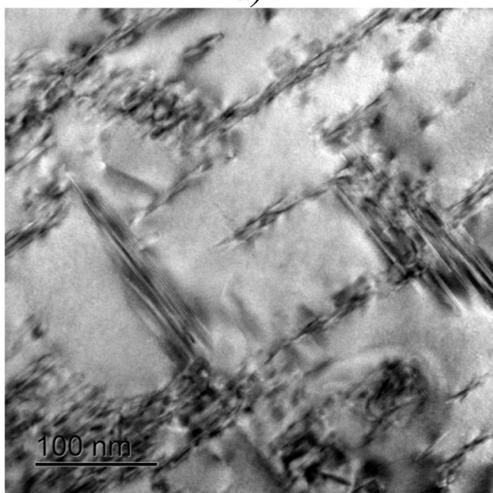
При применении КОТУ повышается электропроводность сплава. Это можно объяснить снижением концентрации легирующих элементов в матричном твердом растворе, вследствие чего возможно увеличение доли упрочняющей фазы.



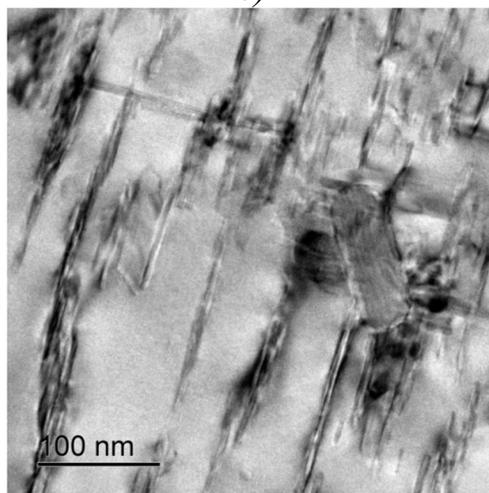
a)



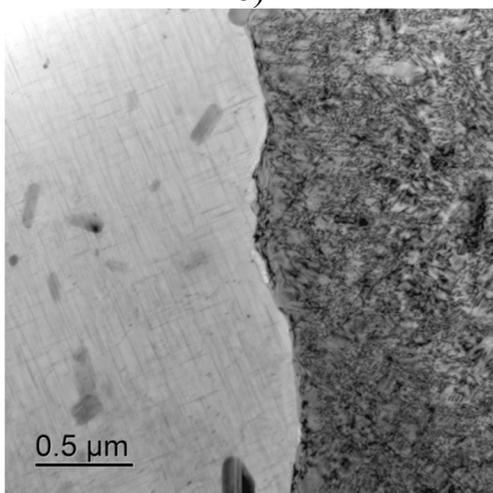
б)



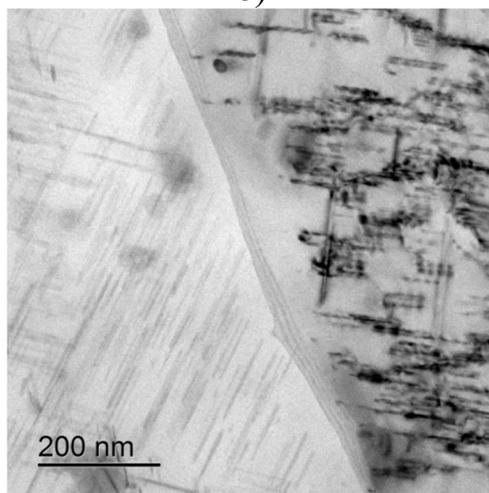
в)



г)

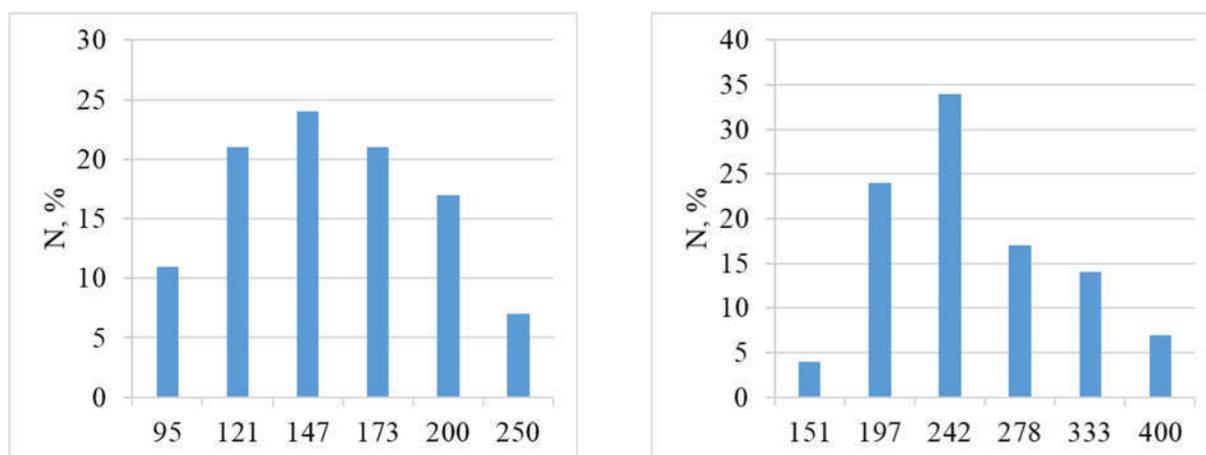


д)



е)

Рис. 5. Микроструктура сплава Д16 после различных термических обработок:
искусственного старения (*a, в, д*) и
искусственного старения (*б, г, е*);
полосы скольжения в поверхностной зоне образцов (*a, б*);
речечные выделения S' -фазы на границах блоков (*в, г*);
отсутствие (*д*) и наличие (*е*) зоны свободной от выделений



Длина включений S' -фазы, нм

а)

б)

Рис. 6. Распределение включений S' -фазы по длине в сплаве Д16 после различных термических обработок: а – закалки + КОТУ + искусственного старения; б – закалки + искусственного старения

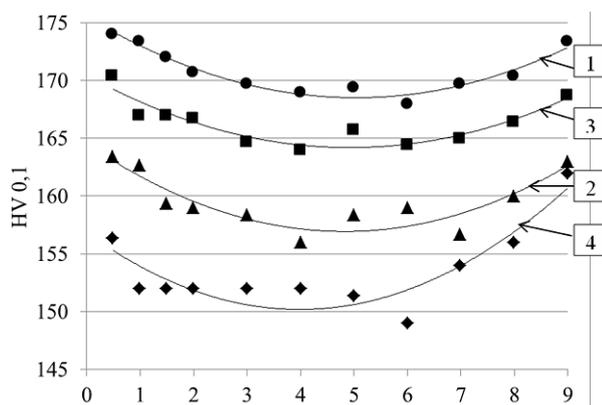
Микротвердость на боковой поверхности кольцевого образца (Рис. 7, а) изменяется по параболическому закону. Максимальная твердость наблюдается вблизи внешней и внутренней цилиндрических поверхностей кольца, минимальная – в центре боковой поверхности. Охлаждение в жидком азоте с последующим нагревом в минеральном масле увеличивают твердость на $6 \pm 0,5$ HV после естественного старения и на $4 \pm 0,5$ HV после искусственного старения.

На Рис. 7, б приведены результаты определения по ГОСТ 11012–2017 стойкости к абразивному изнашиванию: КОТУ снижает скорость абразивного изнашивания сплава Д16 после искусственного старения на 10 %, а после естественного старения – на 30 %.

Указанные изменения электропроводности, твердости и износостойкости после старения, вероятно, связаны с увеличением при термоударе в результате пластической деформации плотности дислокаций, служащих центрами образования мелкодисперсных выделений упрочняющей фазы при старении.

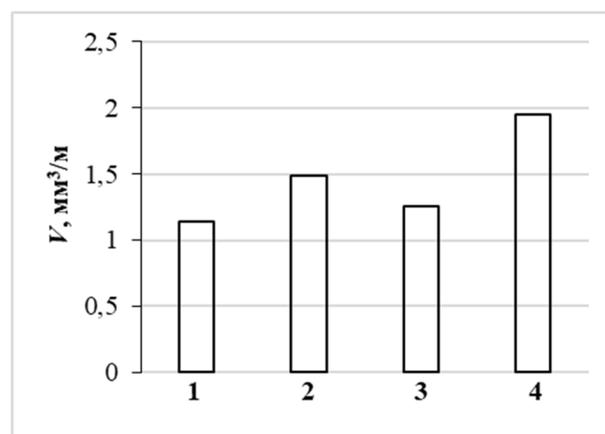
Образцы, при термической обработке которых применяли КОТУ, по прочности удовлетворяют требованиям ГОСТ 21488–97 к сплаву Д16 (таблица 3), а по пластичности – даже превосходят. Применение КОТУ перед естественным старением может приводить к небольшому снижению прочности, вероятно, из-за огрубления структуры образцов при нагреве в масле перед естественным старением, поэтому для снижения в них остаточных напряжений целесообразно проводить нагрев при термоударе до более низкой температуре, например, в кипящей воде.

Для определения изменения механических свойств в поверхностной зоне применен метод инструментального индентирования. Эти исследования показали, что металл в поверхностной зоне сплава после КОТУ и последующего искусственного или естественного старения превосходит по пределу текучести металл, для упрочнения которого не применяли КОТУ.



Расстояние от внешней поверхности кольца, мм

а)



Номер режима обработки

б)

Рис. 7. Изменение микротвердости (а) на боковой поверхности кольцевых образцов и скорость абразивного износа (б), образцы, термообработанные по режимам, приведенным на Рис. 1

Таблица 3

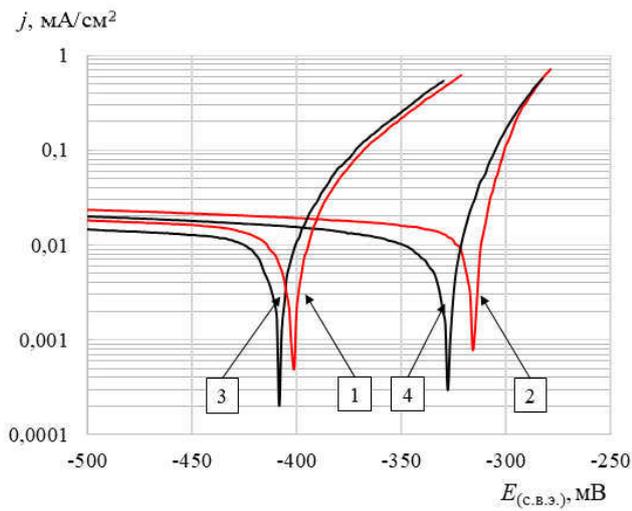
Результаты определения механических свойств образцов при испытании на растяжение

	Значения свойств после термообработки по режиму							
	Т1				Т			
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
С криогенной обработкой и термоударом	462±2	383±2	16,5±0,2	26,6±0,4	468±3	287±2	21,6±0,6	30,5±0,5
Без криогенной обработки и термоудара	463±2	384±1	13,4±2	24,3±1	491±5	326±5	20,8±0,5	26±0,3
Требования по ГОСТ 21488–97	≥425*	≥345*	≥5*	—	≥390	≥275	≥10	—

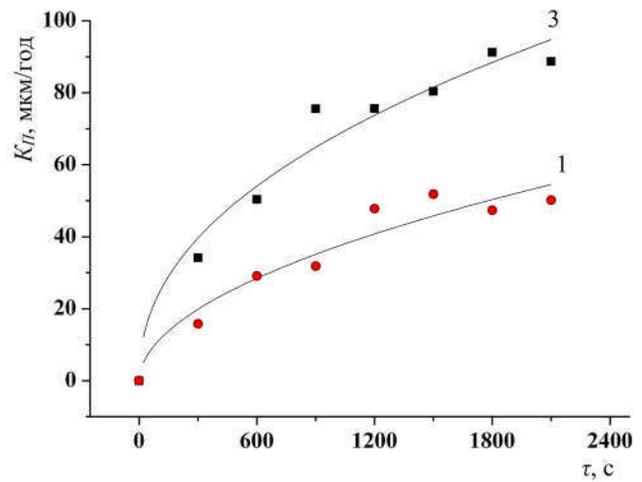
[*] Davis J.R. ASM Speciality Handbook: Aluminium and Aluminium Alloys // ASM International. 1993. 784 P.

Результаты коррозионных исследований приведены на Рис. 8 – КОТУ не оказывают на потенциалы коррозии такого сильного влияния как вид старения. Тем не менее потенциалы коррозии образцов, к которым применяли КОТУ, выше, чем у образцов, которые только закаливали и состаривали (Рис. 8, а).

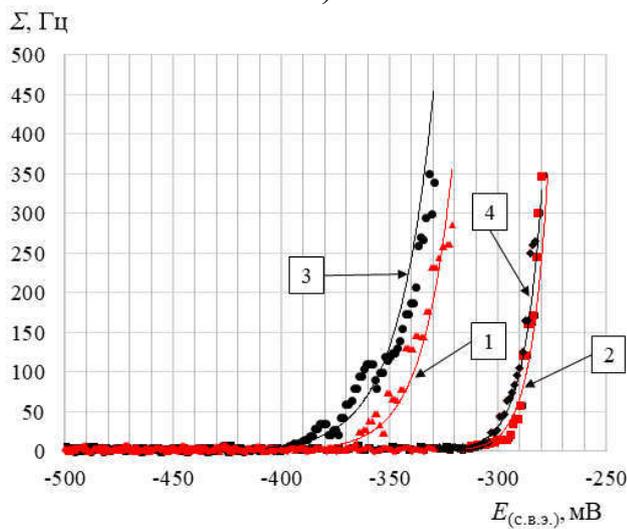
Исследования потенциодинамическим методом показали, что скорость общей коррозии сплава Д16 в 3%-растворе NaCl определяется скоростью катодного процесса. Кинетика изменения скорости общей (K_{II}) и питтинговой коррозии ($K_{ПИТ}$) исследована с помощью коррозиметра Эксперт-004 (Рис. 8, б, в). Зависимость линейного показателя коррозии K_{II} от времени описывается уравнением $K_{II} = 3,08 \cdot \tau^{0,45}$, $R=0,91$ после закалки, КОТУ и искусственного старения и уравнением $K_{II} = 1,08 \cdot \tau^{0,52}$, $R=0,84$ после закалки и искусственного старения. Применение КОТУ позволяет увеличить стойкость на 40 % к общей коррозии и на 34 % к межкристаллитной коррозии. Данные приведенные на Рис. 8, в, свидетельствуют о стабилизации скорости питтинговой коррозии во времени.



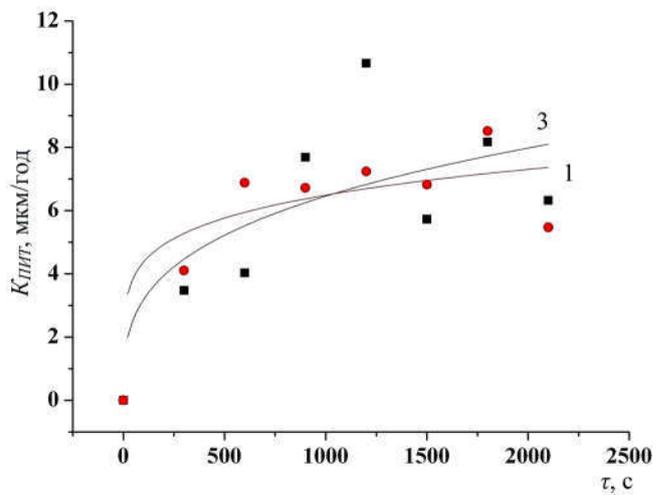
а)



б)



в)



г)

Рис. 8. Результаты исследования электрохимическим (а, б, г) и акустическим (в) методами влияния КОТУ на протекание общей и питтинговой коррозии сплава Д16 в 3%-ном водном растворе NaCl. Цифрами обозначены режимы термической обработки – см. Рис. 1

Частота акустических сигналов, возникающих при коррозионном повреждении защитной оксидной пленки, ниже в случае применения КОТУ, что свидетельствует о положительном влиянии КОТУ на стойкость к питтинговой коррозии (Рис. 8, в).

в поверхностной зоне сплава обнаружены единичные очаги межкристаллитной коррозии. Максимальная глубина межкристаллитной коррозии в образцах после закалки и искусственного старения составляет 50 мкм, а после закалки, КОТУ и искусственного старения: 33 мкм, т. е. на 34 % меньше.

В пятой главе приведены рекомендации по использованию результатов диссертационной работы в промышленности и учебном процессе.

Криогенную обработку с последующим термоударом рекомендуется использовать при изготовлении высокоточных ответственных фасонных изделий из проката, отливок, поковок и СЛС-полуфабрикатов из термически упрочняемых алюминиевых сплавов.

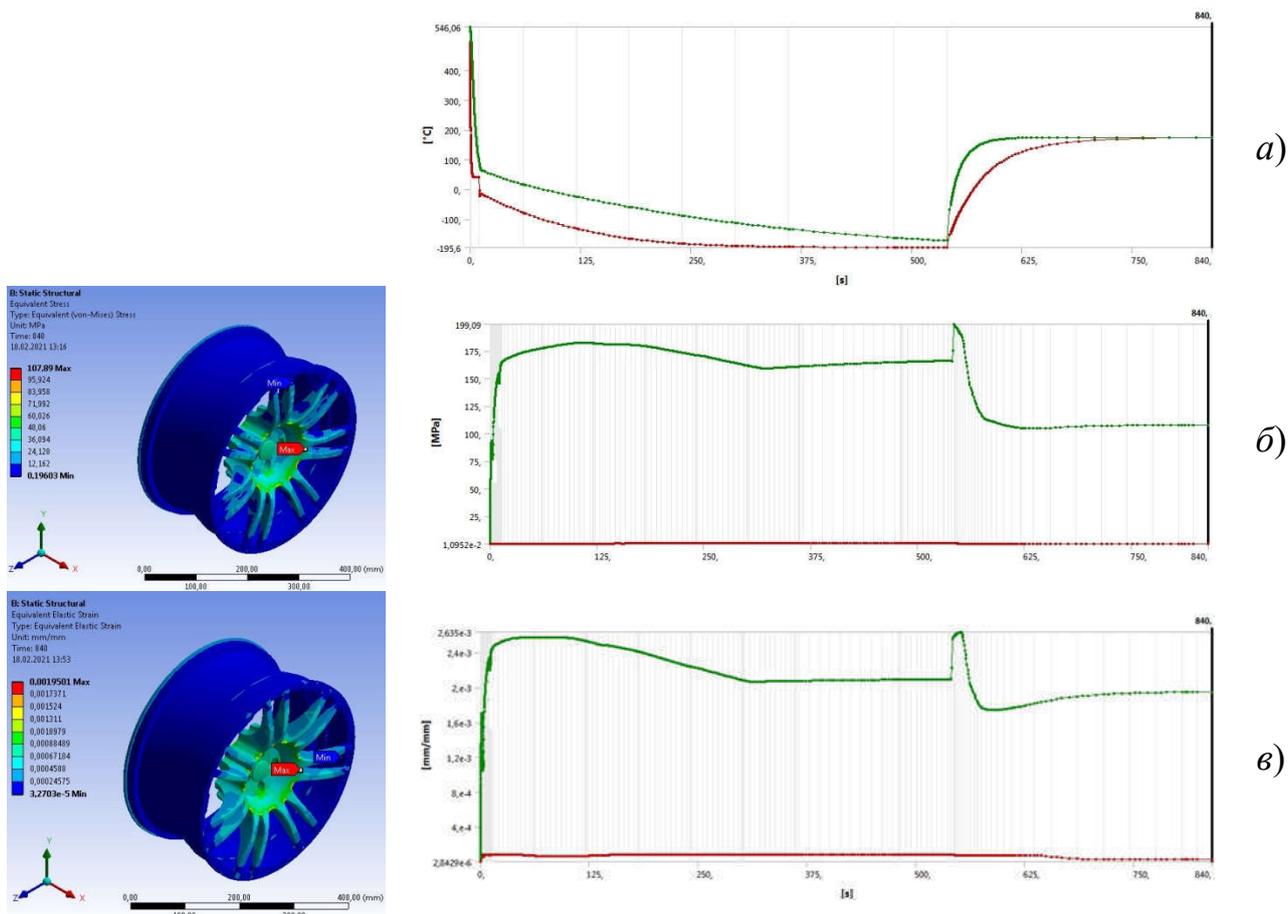


Рис. 9. Результаты расчета температур (а), эквивалентных остаточных напряжений (б) и упругих деформаций (в) в колесном диске из сплава В-1341 при термообработке, включающей закалку с температуры 530 °С и КОТУ

На Рис. 9 приведены результаты расчета температур, эквивалентных остаточных напряжений и упругих деформаций в колесном диске из сплава В-1341, использованные при конструкторской и технологической подготовке его производства и оптимизации режимов закалки и КОТУ. Результаты расчетов позволили снизить припуски на механическую обработку, сократить временные и трудовые затраты, а также расходы на обрабатывающие инструменты. Приведены также сведения о внедрении разработанного оборудования для определения остаточных напряжений методом сверления в учебный процесс.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. На основе анализа зарубежной научно-технической информации установлено, что практически не применяемая и недостаточно изученная в настоящее время обработка, включающая криогенную обработку и термоудар, является в ряде случаев безальтернативным методом, позволяющим:

- снижать остаточные напряжения в фасонных изделиях из термически упрочняемых алюминиевых сплавов;
- снижать их коробление, объемы механической обработки, повышать ее точность и размерную стабильность изделий;
- увеличивать статическую прочность и сопротивление усталости, а также стойкость к коррозионному растрескиванию.

2. Подготовлена база данных и разработана методика для расчета с помощью Ansys остаточных напряжений в изделиях из термически упрочняемых алюминиевых сплавов при их комплексной обработке, включающей закалку, криогенную обработку и термоудар. Определена требуемая для расчета температурная зависимость коэффициента теплоотдачи жидкого азота. Разработанная методика позволяет в зависимости от состава сплава, геометрической формы изделий и требований к ним научно обоснованно выбирать технологические среды и оптимизировать режимы закалки, криогенной обработки и термоудара.

3. Методом сверления определено влияние режимов КОТУ на остаточные макронапряжения в образцах из сплава Д16. Предлагаемая термическая обработка, включающая охлаждение исследованных образцов из сплава Д16 после закалки в воде с последующим охлаждением в жидком азоте до температуры $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ и нагревом в масле до $+175\text{ }^{\circ}\text{C}$, уменьшает максимальные остаточные макронапряжения в исследованных кольцевых и прямоугольных образцах после естественного старения до 26 %, а после искусственного старения до 71 %. Показано, что снижая уровень остаточных макронапряжений, КОТУ снижает отклонение от круглости на 55 % при механической обработке трубчатых заготовок. Рентгеноструктурным методом Шеррера показано, что данная термическая обработка снижает размер блоков в прямоугольных образцах с $87,8\pm 11,2$ до $70,2\pm 4,0$ нм, а уровня микронапряжений с $99,58\pm 12$ до $55,94\pm 10$ МПа.

4. Изучено влияние режимов КОТУ на механические свойства образцов из сплава Д16. Дюротометрическим методом и методом инструментального индентирования установлено увеличение твердости и предела текучести поверхностной зоны образцов, обработанных с применением КОТУ. Вероятной причиной этого является образование дополнительного числа выделений на образующихся при термоударе дислокациях. При испытаниях на растяжение показано, что образцы, при термической обработке которых применяли КОТУ, по значению пределов текучести и прочности, относительного удлинения и сужению удовлетворяют требованиям к сплаву Д16 в состояниях после естественного и искусственного старения. Отрицательный эффект от снижения полезных сжимающих напряжений в поверхностной зоне изделия в них компенсируется упрочнением поверхностной зоны и снижением опасных растягивающих напряжений в центре изделия. За счет увеличения доли винтовых дислокаций, активизирующих динамический возврат, КОТУ увеличивает пластичность сплава.

5. Установлено, что, гомогенизируя структуру, подавляя образование зоны свободной от выделений на границах зерен и способствуя образованию на границах зерен обособленных мелкодисперсных выделений, КОТУ увеличивает стойкость сплава Д16 на 40 % к общей коррозии и на 34 % к межкристаллитной коррозии.

6. Криогенная обработка с последующим термоударом позволяет увеличить стойкости к абразивному изнашиванию сплава Д16 в искусственно состаренном состоянии – на 10 %, а в естественно состаренном состоянии – на 30 %.

7. Результаты работы внедрены в опытном производстве Академии технологий (г. Ханой, Вьетнам), что позволило: снизить продолжительность технологической подготовки производства, объем механической обработки и брака, а также улучшить эксплуатационные свойства изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов.

8. Результаты работы и изготовленное оборудование для определения остаточных напряжений методом сверления приняты для использования в учебном процессе обучения бакалавров и выполнения профильных квалификационных работ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Май Суан Зунг, Пучков Ю.А., Щербаков С.П. Исследование влияния восходящей закалки на остаточные напряжения и свойства алюминиевого сплава Д16 // Заготовительные производства в машиностроении, 2020. Т 18. № 3. С. 125–129. (0,3 п. л./ 0,2 п. л.).

2. Май Суан Зунг, Пучков Ю.А., Плохих А.И., Бенариеб И.. Исследование влияния режимов термической обработки на закалочные напряжения и свойства сплава Д16 // Научные технологии в машиностроении, 2020. № 4 (106). С. 9–17. (0,6 п. л./ 0,3 п. л.).

3. Май Суан Зунг, Гневко А.И., Пучков Ю.А. Исследование влияния криогенной обработки на остаточные напряжения и свойства алюминиевого сплава Д16 // Авиационные материалы и технологии, 2020. № 2 (59). С. 25–31. (0,5 п. л./ 0,3 п. л.).

4. Май Суан Зунг, Гневко А.И., Пучков Ю.А., Плохих А.И., Куранов А.Е., Яременко О.Б. Влияние криогенной обработки и термоудара на закалочные напряжения и свойства сплава Д16 // Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 2020. № 4 (13). С. 473–486. (0,9 п. л./ 0,4 п. л.).

5. Mai Xuan Dung, Y.A. Puchkov, S.L. Berezina. Influence of uphill quenching on residual stresses and properties of alloy D16 // Materials Today: Proceedings, Vol. 38 (4), 2021. pp. 1294–1298. (0,3 п. л./ 0,2 п. л.).

6. Май Суан Зунг, Пучков Ю.А. Влияние криогенной обработки на закалочные напряжения и свойства сплава Д16 // Новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование: Сб. тез. Докл. материалы I Международной молодежной научной конференции. М., 2020. С. 73–77. (0,3 п. л./ 0,2 п. л.).

7. Май Суан Зунг. Исследование влияние термической обработки на остаточное напряжение в сплаве Д16 // Будущее машиностроения России: Сб. тез. докл. XII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов. М., 2019. С. 252–256. (0,3 п. л./ 0,3 п. л.).

8. Желанов Е.А., Май Суан Зунг, Бенариеб И., Пучков Ю.А. Исследование влияния криогенной обработки и термоудара на остаточные закалочные напряжения в образцах из алюминиевого сплава Д16 расчетным методом // Будущее машиностроения России: Сб. тез. докл. XIII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов. М., 2020. С. 125–128. (0,3 п. л./ 0,1 п. л.).

Подписано в печать2021. Заказ №
Объем 1 печ.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, (499) 263-62-01