

На правах рукописи

ФАМ ХОНГ ФУ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ
СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Mg-Si НА ОСНОВЕ ВЫБОРА РЕЖИМОВ
ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ЗАКАЛКЕ**

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2016

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете
имени Н. Э. Баумана

Научный руководитель: Пучков Юрий Александрович
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Захаров Валерий Владимирович
доктор технических наук, главный научный
сотрудник ОАО «Всероссийский институт легких
сплавов»

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

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт металлургии и
материаловедения им. А.А. Байкова». Российской
академии наук.

Защита состоится « ____ » 2016 года в ____ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.141.04 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим
направлять указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.
Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

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

Автореферат разослан « ____ » 2016 г.

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

В.И. Семенов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Деформируемые сплавы системы Al-Mg-Si широко применяются в авиационной промышленности, ракетостроении, судостроении, а также железнодорожном и автомобильном транспорте. Для этих сплавов характерна высокая штампаемость, свариваемость, обрабатываемость резанием при сравнительно высокой прочности и коррозионной стойкости в термически упрочненном состоянии. Перспективным сплавом системы Al-Mg-Si с повышенной конструкционной прочностью и технологичностью, не уступающим по свойствам иностранным аналогам, является сплав В-1341.

Для ускорения внедрения сплавов системы Al-Mg-Si целесообразно использование систем автоматического проектирования. Свою эффективность доказали программные комплексы для выбора режимов литья, сварки, обработки давлением. Однако выбор режимов термической обработки с применением компьютерных технологий применяется еще недостаточно, главным образом из-за недостаточности сведений о математической связи структуры и свойств с режимами термической обработки.

Свойства термически упрочняемых алюминиевых сплавов сильно зависят от скорости охлаждения изделия при закалке, определяющей структуру и уровень остаточных напряжений. Снижение конструкционной прочности, склонности к питтинговой и межкристаллитной коррозии при замедленном охлаждении от температуры закалки связано с образованием крупных неравноосных выделений, зон свободных от выделений, а также снижением доли включений упрочняющей фазы. Необходима разработка математической модели, позволяющей прогнозировать влияние скорости охлаждения при закалке на свойства изделий и позволяющей выбирать охлаждающие среды.

Теоретической базой для прогнозирования механических и коррозионных свойств изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов является метод закалочного фактора, разработанный Стейли. Для реализации этого метода на практике необходимо определить изменение температур в точках изделия и используя С-кривую достижения свойства данного сплава рассчитать закалочный фактор и данное свойство в точках изделия. Поэтому построение С-кривых достижения свойств сплава В-1341 является необходимым условием для прогнозирования свойств изделий из этого сплава и выбора режимов его охлаждения. Как показано в ряде исследований для увеличения точности прогнозирования необходимо внести изменения в метод закалочного фактора. Кроме того, необходимо искать и другие способы построения С-кривых достижения свойств, так как основной метод их построения - метод изотермической закалки, отличается сравнительно высокой трудоемкостью.

Таким образом, в настоящее время актуальной задачей является разработка научно-методической базы для более точного прогнозирования механических и коррозионных свойств изделий из деформируемых термически упрочняемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si.

Целью работы является выбор режимов охлаждения при закалке и снижение затрат на стадии подготовки производства изделий из

деформируемых термически упрочняемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si на основе разработки и совершенствования методики прогнозирования механических и коррозионных свойств.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Теоретически и экспериментально исследовать влияние режима охлаждения при закалке на структуру, механические и коррозионные свойства сплава В-1341.

2. Увеличить достоверность результатов прогнозирования механических свойств термически упрочняемых алюминиевых сплавов на основе совершенствования существующей методики с применением закалочного фактора.

3. Построить С-кривые достижения механических свойств сплава В-1341.

4. Разработать расчетно-экспериментальную экспресс-методику для построения С-кривых достижений свойств с помощью метода торцовой закалки.

5. Разработать методику прогнозирования коррозионных свойств изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si.

6. Разработать и компьютерно реализовать математические модели, позволяющие выбирать режим охлаждения при закалке на стадии проектирования изделий.

Объектами исследования являются деформируемый термически упрочняемый алюминиевый сплав В-1341 системы Al-Mg-Si.

Предметом исследования является прогнозирование и оптимизация механических и коррозионных свойств изделий из деформируемых термически упрочняемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si с применением теории закалочного фактора.

Научная новизна:

1. Впервые:

- построены С-кривые достижения свойств (предела текучести, временного сопротивления, твердости, относительного удлинения) для сплава В-1341;

- разработана расчетно-экспериментальная экспресс-методика построения С-кривых с помощью метода торцовой закалки;

- установлена научно обоснованная математическая зависимость скорости коррозии дисперсионно-упрочняющихся алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si от режимов охлаждения при закалке.

2. Усовершенствована методика прогнозирования механических свойств изделий из деформируемых термически упрочняемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si.

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. Использование усовершенствованной методики прогнозирования механических свойств фасонных изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов ускоряет процесс проектирования деталей и разработку технологии их термической обработки, обеспечивающей заданный комплект механических свойств.

2. Разработанная расчетно-экспериментальная экспресс-методика с применением метода торцовой закалки позволяет снизить трудовые и материальные затраты при построении С-кривых достижения свойств термически упрочняемых алюминиевых сплавов в 2-3 раза.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы неоднократно доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также на V, VII и VIII Всероссийских конференциях молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2012, 2014, 2015; Вьетнамо-Российской международной научной конференции. Ханой (Вьетнам), 2015.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в 9 научных работах, в том числе – 4 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы из 101 наименования. Работа изложена на 143 страницах, содержит 91 рисунков и 19 таблиц.

Автор выражает глубокую признательность д.т.н., профессору Полянскому В.М., к.т.н., доценту Плохих А.И., к.т.н., доценту Карпухину Д.С., к.ф.м.н., доценту Табачковой Н.Ю. за помощь при подготовке работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе «Литературный обзор» рассмотрены характеристики термически упрочняемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si и влияние термической обработки на их механические и коррозионные свойства. Показано, что режим охлаждения при закалке, как и режимы старения, оказывает сильное влияние на структуру и комплекс механических свойств термически упрочненных изделий. Показано, что недостаточная скорость охлаждения при закалке приводит к распаду пересыщенного твердого раствора и образованию крупных включений интерметаллидов на основе Mg и Si, что при старении сплава уменьшает долю мелкодисперсных включений упрочняющей фазы. В то же время необоснованно высокая скорость охлаждения приводит к росту остаточных напряжений и короблению. Проанализированы физические модели прочности и особенности их применения для прогнозирования свойств алюминиевых сплавов этой системы.

В качестве базисной модели прогнозирования механических свойств изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов выбрана модель теории закалочного фактора. Показано, что для практической реализации этой модели для изделий из перспективного сплава В-1341 необходимо построить С-кривые достижения его свойств и изучить влияние режимов изотермической закалки на состав и морфологию образующихся фаз. Наряду с этим методом для построения С-кривой достижения свойств также рассмотрена возможность применения менее трудоемкой торцовой закалки. Рассмотрены факторы, влияющие на коррозионную стойкость термически упрочняемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si. Показано, что скорость охлаждения при закалке оказывает существенное влияние на структуру и коррозионные свойства этих сплавов. Проанализированы возможности моделирования зависимости коррозионных свойств от продолжительности выдержки при изотермической закалке. Сформулированы задачи работы.

Во второй главе приведены материалы, методики проведения исследований и испытаний. Объектом исследований являлись листы толщиной 1,6 мм из сплава В-1341, изготовленные на ОАО «КУМЗ». Химический состав сплава определен на атомно-эмиссионном спектрометре с лазерным возбуждением «ЛАЭС» (Таблица 1).

Изотермическую закалку проводили в камерной печи СНОЛ-1,6.2.5.1/11-М1-У4.2 и шахтной печи СШОЛ-1,2 с соляными ваннами состава: 55 % NaNO_3 + 45 % NaNO_2 . При закалке образцы помещали в соляную ванну первой печи с температурой 530 °C и выдерживали в течение 10 мин, после чего быстро (за 1 - 2 с) переносили образцы в соляную ванну второй печи. Температуру в соляной ванне второй печи поддерживали равной одной из температур: 250, 300, 350, 400 °C, а продолжительность выдержки в соляной ванне второй печи выбирали равной 5, 20, 80, 320, 1280 с; после выдержки образцы охлаждали в воде.

Таблица 1.
Химический состав образцов из исследованного сплава В-1341

Сплав	Содержание элементов, % (мас.)								
	Mg	Si	Cu	Mn	Cr	Ca	Zn	Fe	Ti
В-1341	0,64	0,81	0,30	0,26	0,16	–	0,06	0,19	0,07

Торцовую закалку проводили на специальной установке, состоящей из бака емкостью 0,050 м³ и водяного насоса, создающего вертикальную струю воды, истекающую из сопла диаметром 12 мм со скоростью 0,17 л/с на высоту 100 мм. Образец (40×40×140 мм), нагретый до температуры закалки (530 °C) в камерной печи, подвешивали над соплом, расстояние от торца образца до сопла составляло 20 мм. Закалку проводили в воде с температурой 20 °C. Старение при 170 °C в течении 14 ч проводили для всех образцов в камерной печи BINDER ED-23 в воздушной атмосфере.

Твердость сплавов определяли на твердомере Dura Vision 20/30 (по Виккерсу) с нагрузкой 200 МПа и выдержкой 10 с. Испытания на разрыв для определения механических свойств сплава проводили на универсальной машине типа ИР 5047-50 со скоростью деформирования 2 мм/мин.

Структурные исследования проводили с помощью светового микроскопа Olympus GX51, электронного сканирующего микроскопа TESCAN VEGA 2 LMH и электронного просвечивающего микроскопа JEM-2000 EX. Дифференциальную сканирующую калориметрию проводили на приборе DSC 404 F1 Pegasus. Расчет температурного поля изделий при охлаждении от температуры закалки рассчитывали в программном комплексе ANSYS.

Коррозионные исследования выполнены потенциодинамическим методом на потенциостате IPC Pro MF, а также методом электрохимической импедансной спектроскопии с помощью анализатора частотного отклика FRA2. Скорость коррозии определена методом поляризационного сопротивления по стандарту ASTM G102.

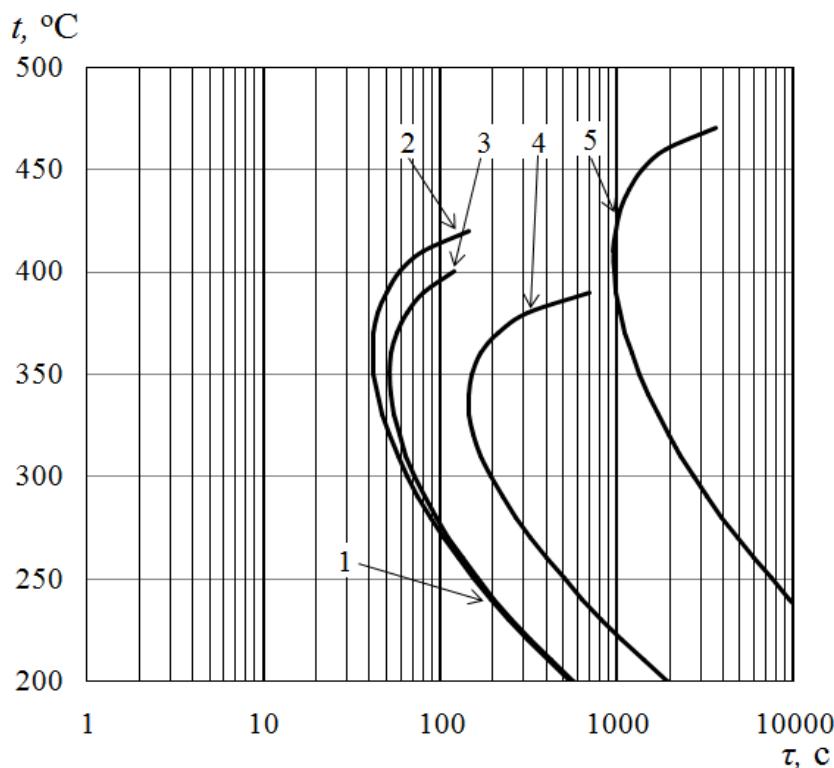
Для оценки случайной погрешности измерений определяли среднеквадратичное отклонение S . Уровень доверительной вероятности α принимали равным 0,95. Величину доверительного интервала определяли по уравнению:

$$X - \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot t < x < X + \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot t ,$$

где X - среднее значение, t - критерий Стьюдента, n - число измерений.

В третьей главе исследованы структурные изменения сплава В-1341 после различной продолжительности изотермической выдержки при закалке.

Расчетным методом установлено, что при распаде пересыщенного твердого раствора сплава В-1341 во время изотермической выдержки при закалке образуются: зоны Г-П, метастабильная когерентная β'' -фаза ($Al_2Mg_5Si_4$), метастабильная полукогерентная β' -фаза ($Mg_{1,8}Si$), медьсодержащая Q -фаза ($Al_5Cu_2Mg_8Si_6$), а также стабильная некогерентная β -фаза (Mg_2Si) (Рис. 1, Таблица 2).



1 – 3ГП, 2 – β'' -фаза, 3 – β' -фаза; 4 – Q -фаза; 5 – β -фаза (Mg_2Si)

Рис. 1. Диаграмма изотермического распада сплава В-1341

Таблица 2.

Последовательность образования выделений при распаде пересыщенного твердого раствора сплава В-1341 в процессе охлаждения при закалке

Выделения	Состав, вид	Тип КР, параметры, нм
1 - ГП зоны	Игольчатые	C2/m a=1,48; b=0,405; c=0,648; $\beta=105^\circ$
2 - β'' -фаза	$Al_2Mg_5Si_4$ (Mg_5Si_6), иглообразные (когерентные)	C2/m a=1,516; b=0,405; c=0,674; $\beta=105^\circ$
3 - β' -фаза	$Mg_{1,8}Si$, реечные (полукогерентные)	P6 ₃ a=b=0,715; c=0,405; $\gamma=120^\circ$
4 - Q-фаза	$Al_5Cu_2Mg_8Si_6$, сферические	P6 ₃ /m a=b=1,032; c=0,405; $\gamma=120^\circ$
5 - β -фаза	Mg_2Si , пластинчатые (некогерентные)	Fm3m a=0,6354

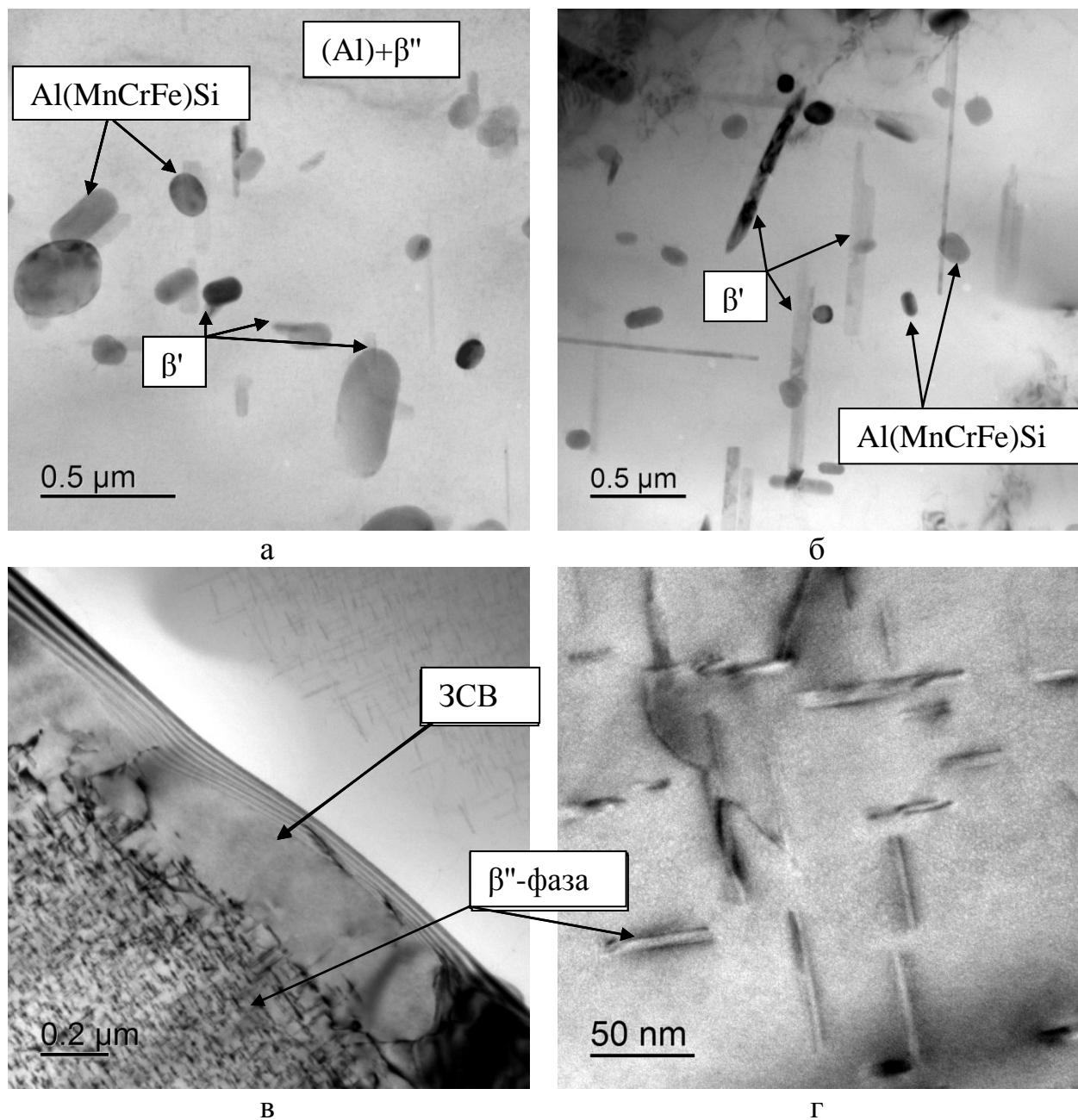
Световая микроскопия показала, что после изотермической закалки и старения в сплаве присутствуют многочисленные включения дисперсида с диаметром до 5 мкм. МРСА показал, что дисперсиды содержат, % (мас.): (75 - 85) Al, (5 - 10) Si, (6 - 11) Fe, (2 - 5) Mn, т.е. соответствует фазе α -Al(MnCrFe)Si с кубической решеткой (a=1,26 нм).

Методом электронной просвечивающей микроскопии показано, что при небольшой продолжительности (5 с) изотермической выдержки на поверхности дисперсида образуются реечные выделения (Рис. 2).

При длительной выдержке – реечные выделения образуются не только на поверхности дисперсида но в твердом растворе. Морфология этих выделений и отношение в них атомных процентов Mg/Si=1,8 свидетельствует о том, что они являются β' -фазой. Отсутствие контраста в области изображения, примыкающей к рейкам свидетельствует о слабом искажении кристаллической решетки матрицы вокруг реек.

С увеличением продолжительности выдержки при изотермической закалке длина реек увеличивается от 100...200 до 500...1000 нм, вокруг границ зерен и реек увеличивается ширина зоны свободной от выделений β'' -фазы; в отдельных местах наблюдается срастание реек, ведущее к появлению пластин (Рис. 2б).

Увеличение продолжительности изотермической выдержки приводит к уменьшению плотности выделений когерентной β'' -фазы, искажающей кристаллическую решетку матрицы, о чем можно судить по изменению контраста областей вокруг стержней из β'' -фазы (Рис. 2г).

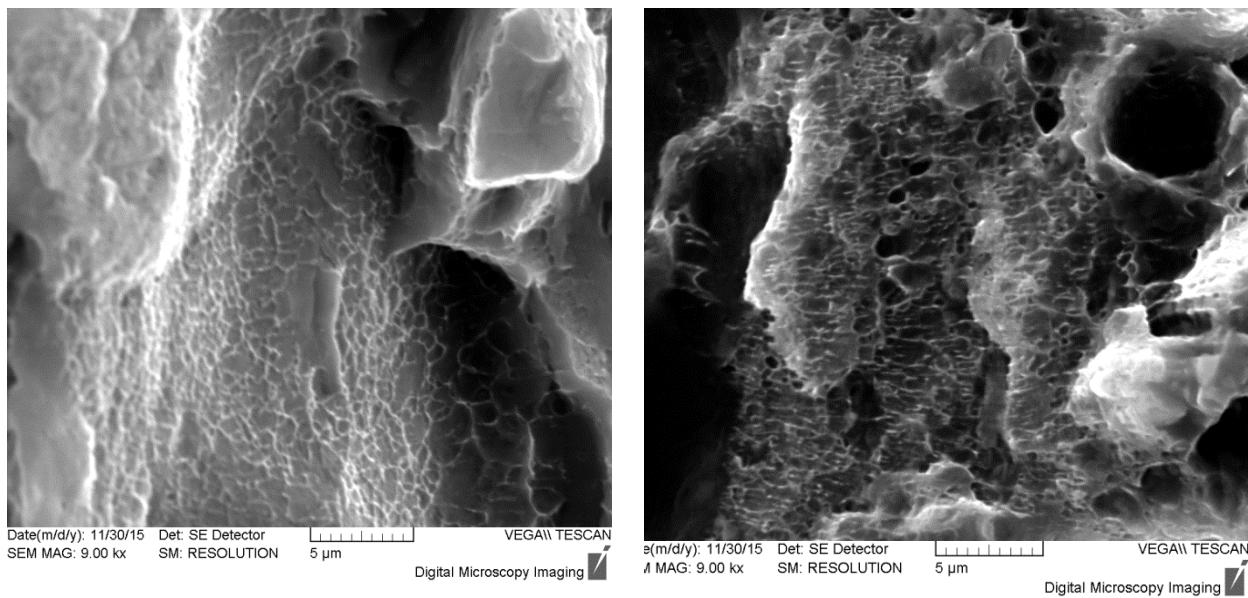


Продолжительности выдержки в соляной ванне с $t=350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ при изотермической закалке:

а - 5 с; б - 1280 с; в, г - 80 с

Рис. 2. Изображение участков сплава В-1341 после изотермической закалки и старения

Увеличение продолжительности изотермической выдержки изменяет структуру поверхности излома, образовавшегося в результате испытания на разрыв. На поверхности образцов с продолжительностью изотермической выдержки 1280 секунд, наблюдаются глубокие поры и острые гребни, что свидетельствует о высокой пластичности сплава в этом состоянии (Рис. 3), увеличивается доля сравнительно крупных вытянутых ямок, свидетельствующая о разрушении по многочисленным выделениям реечной β' -фазы и об уменьшении участия в процессе разрушения сплава мелкодисперсных упрочняющих стержневых когерентных включений $\beta''\text{-фазы}$.



а

б

Продолжительность выдержки при изотермической закалке 5 с (а) и 1280 с.

Рис. 3. Фрактограмма поверхности разрушения в результате испытания на разрыв сплава В-1341, подвергнутого закалке с изотермической выдержкой при 350 °С и последующему искусственному старению, первоначальное увеличение x9000, при печати x1250)

На кривых дифференциальной сканирующей калориметрии, полученных при нагреве термообработанных образцов наблюдается два локальных максимума. Первый максимум, при температурах от 220 до 280 °С, свидетельствует о начале превращения β'' -фазы в β' -фазу. Второй локальный максимум при температурах от 430 до 470 °С соответствует превращению β' - фазы в β -фазу.

Величины тепловых эффектов пропорциональны условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$ и твердости HV 20 и обратно пропорциональны относительному удлинению сплава, что свидетельствует об уменьшении доли включений упрочняющей β'' -фазы при увеличении продолжительности изотермической выдержки. (Таблица 3).

Таблица 3.
Механические характеристики сплава В-1341 и тепловые эффекты ΔH от фазовых превращений при нагреве образцов

Режим изотермической выдержки		ΔH , мДж/г		$\sigma_{0,2}$, МПа	HV 20	δ , %
τ , с	t , °С	$\beta'' \Rightarrow \beta'$	$\beta' \Rightarrow \beta$			
5	350	2371	1612	279	103	8
1280		967,5	1102	86	41	21

В четвертой главе рассмотрены основные направления улучшения результатов прогнозирования при применении теории закалочного фактора, а

также приведены результаты построения С-кривых достижения механических свойств этого сплава методом изотермической закалки. В конце главы приведены результаты прогнозирования механических свойств и выбора закалочной охлаждающей среды для колесного диска автомобиля из сплава В-1341.

Для построения С-кривых достижения свойств с использованием метода изотермической закалки были построены зависимости механических характеристик (твердости, временного сопротивления, предела текучести, относительного удлинения) данного сплава от продолжительности изотермической выдержки при температурах 250, 300, 350, 400 °C. Далее, по полученным зависимостям, для массивов значений этих характеристик, соответствующих определенному проценту от экстремального, для соответствующего значения K_1 , используя уравнение (1) по специально написанной в среде Matlab программе, были построены С-кривые достижения данного свойства (Рис. 4).

$$\tau_C = -K_1 \cdot K_2 \cdot \exp\left(\frac{K_3 \cdot K_4^2}{RT(K_4 - T)^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{K_5}{RT}\right) , \quad (1)$$

где $\tau_C(T)$ - время до образования определенной доли выделения; K_1 - коэффициент, равный $\ln(1-x)$, где x : доля образовавшегося выделения (для сплава, содержащего 0,5 % выделений данного типа, $K_1 = \ln(1-0,005) = -0,00501$); K_2 - коэффициент, связанный с обратной величиной скорости зародышеобразования, 1/с; K_3 - коэффициент, связанный с работой образования зародыша, Дж/моль; K_4 - коэффициент, связанный с температурой растворения β - фазы, К; K_5 - коэффициент, связанный с энергией активации процесса диффузии, Дж/моль; R - газовая постоянная, 8,314 Дж/(моль·К); T – температура, К.

При построении С-кривых до минимума было сокращено количество подгоночных коэффициентов в уравнении (1). K_4 был выбран равным температуре сольвуса β -фазы в данном сплаве, т.е. 798 К. А коэффициент K_5 был выбран равным 55960 Дж/моль, с учетом влияния закалочных вакансий на диффузию в сплавах данной системы. Принимали, что в соответствии с уравнением Орована прочность сплава пропорциональна корню квадратному из доли упрочняющей фазы. Для описания зависимости доли упрочняющей фазы и дисперсионного упрочнения от продолжительности изотермической выдержки рассмотрели 10 вариантов расчета, так как для данной системы расчетные модели не разработаны, а для описания других систем наряду с уравнением Колмогорова-Аврами используют уравнение Остина-Риккетса и с различными значениями степенных показателей. В результате численного эксперимента, было показано, что уравнение Колмогорова-Аврами со степенным показателем 1,5 наилучшим образом описывает полученные экспериментальные зависимости. Подробно методика построения С-кривых приведена в диссертации.

Закалочный фактор Q рассчитывают по кривой охлаждения и С-кривой достижения свойств по уравнению (2).

$$Q = \int_{T_h}^{T_k} \frac{\Delta\tau}{\tau_C} \cdot \Delta T = \int_{T_h}^{T_k} \frac{dT}{v_{\text{охл}} \cdot \tau_C} , \quad (2)$$

где T_h , T_k - температура начала и конца процесса закалки; $v_{\text{охл}}$ - скорость охлаждения при данной температуре; $\tau_C(T)$ - время до образования определенной доли выделения, с; T – температура, К.

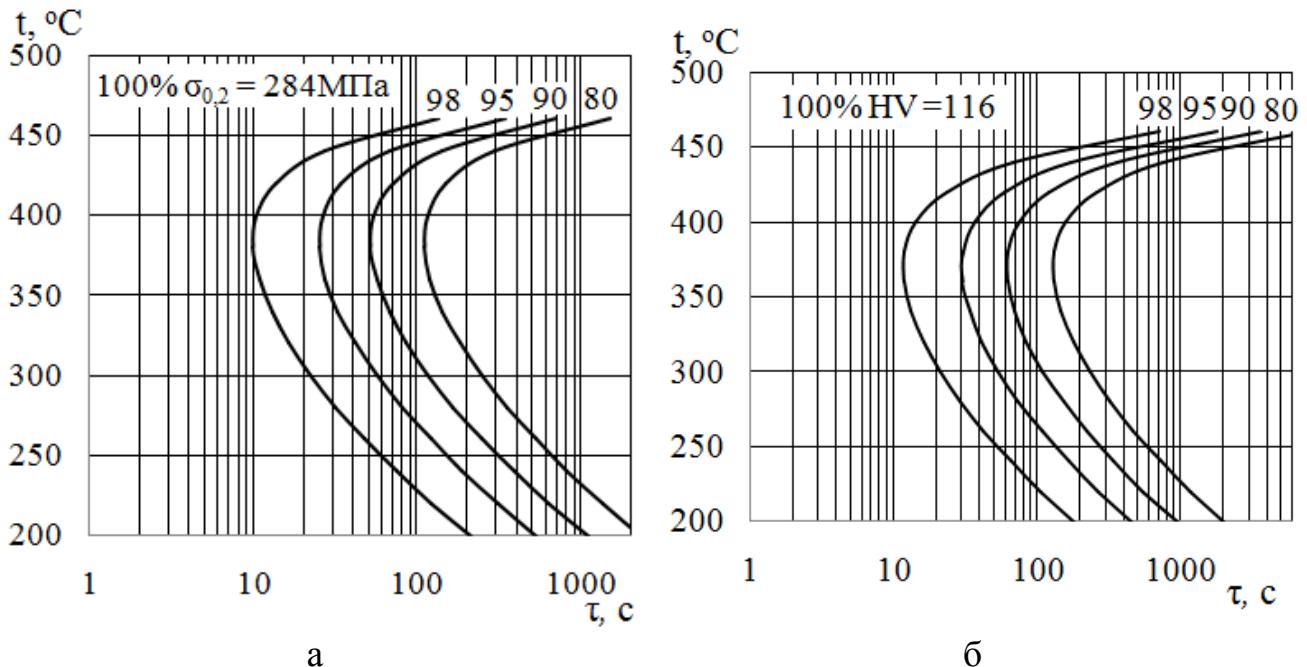


Рис. 4. С-кривые достижения 98, 95, 90, 80 % предела текучести (а) и твердости (б) сплава В-1341, построенные методом изотермической закалки

Для прогнозирования механических свойств использовали уравнения (3) и (4):

$$\frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}} = \left\{ \exp \left[- \left(\int_{T_h}^{T_k} \frac{dT}{-v_{\text{охл}} \cdot K_2 \cdot \exp \left(\frac{K_3 \cdot K_4^2}{RT(K_4 - T)^2} \right) \cdot \exp \left(\frac{K_5}{RT} \right)} \right)^{1,5} \right] \right\}^{1/2} , \quad (3)$$

$$\frac{HV - HV_{\min}}{HV_{\max} - HV_{\min}} = \left\{ \exp \left[- \left(\int_{T_h}^{T_k} \frac{dT}{-v_{\text{охл}} \cdot K_2 \cdot \exp \left(\frac{K_3 \cdot K_4^2}{RT(K_4 - T)^2} \right) \cdot \exp \left(\frac{K_5}{RT} \right)} \right)^{1,5} \right] \right\}^{1/2} , \quad (4)$$

где σ_{\max} и HV_{\max} - максимальное значение предела текучести и твердости сплава после старения; σ_{\min} и HV_{\min} - минимальное значение - после старения.

В качестве примера проводили прогнозирование механических свойств реального изделия – колесного диска автомобиля для выбора закалочной охлаждающей среды (Таблица 4).

Рекомендовано в качестве закалочной охлаждающей среды использование водополимера, так как он позволяет получить требуемую прочность и твердость при сравнительно низкой скорости охлаждения и низком уровне остаточных напряжений.

Таблица 4.

Расчетные значения закалочного фактора и прогнозируемые величины механических свойств диска при закалке в различных охлаждающихся средах

№	Охлаждающая среда	$V_{\text{охл}}$	Q , с	HV	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа
1	воздух	мин.	6,65	89	213	274
2		мак.	21,18	47	101	164
3	вода с $t=55$ °C	мин.	0,07	116	284	343
4		мак.	0,58	115	281	341
5	20 % водный раствор полимера UCON Quenchant, скорость циркуляции $V = 0,25$ м/с, $t = 43$ °C	мин.	0,20	116	283	343
6	мак.	1,42	113	275	335	

Пятая глава посвящена разработке расчетно-экспериментальной экспресс-методики построения С-кривых достижения механических свойств термически упрочняемых сплавов с применением метода торцовой закалки.

В отличие от метода изотермической закалки, где для построения С-кривой выполняли минимально 16 изотермических закалок по различным режимам в соляных ваннах, в этом случае достаточно провести закалку только одного торцевого образца в воду, что сильно сокращает материальные и временные затраты. Блок-схема построения С-диаграммы по этой методике приведена на Рис. 5.

Режимы охлаждения в точках, находящихся на определенных расстояниях от охлаждаемого торца, рассчитаны с помощью программы Ansys. Для расчетов по уравнениям (3, 4) скорости охлаждения $v_{\text{охл}}$ в точках образца были выражены полиномом четвертой степени:

$$v_{\text{охл}} = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4,$$

коэффициенты K_2 , K_3 рассчитаны с применением программ в среде Matlab, разработанных автором. По полученным значениям K_2 , K_3 построили С-образные кривые достижения твердости для сплава В-1341 (Рис. 6).

Среднеквадратичное отклонение построенной С-кривой от С-кривой, построенной методом изотермической закалки, составляет менее 5%.

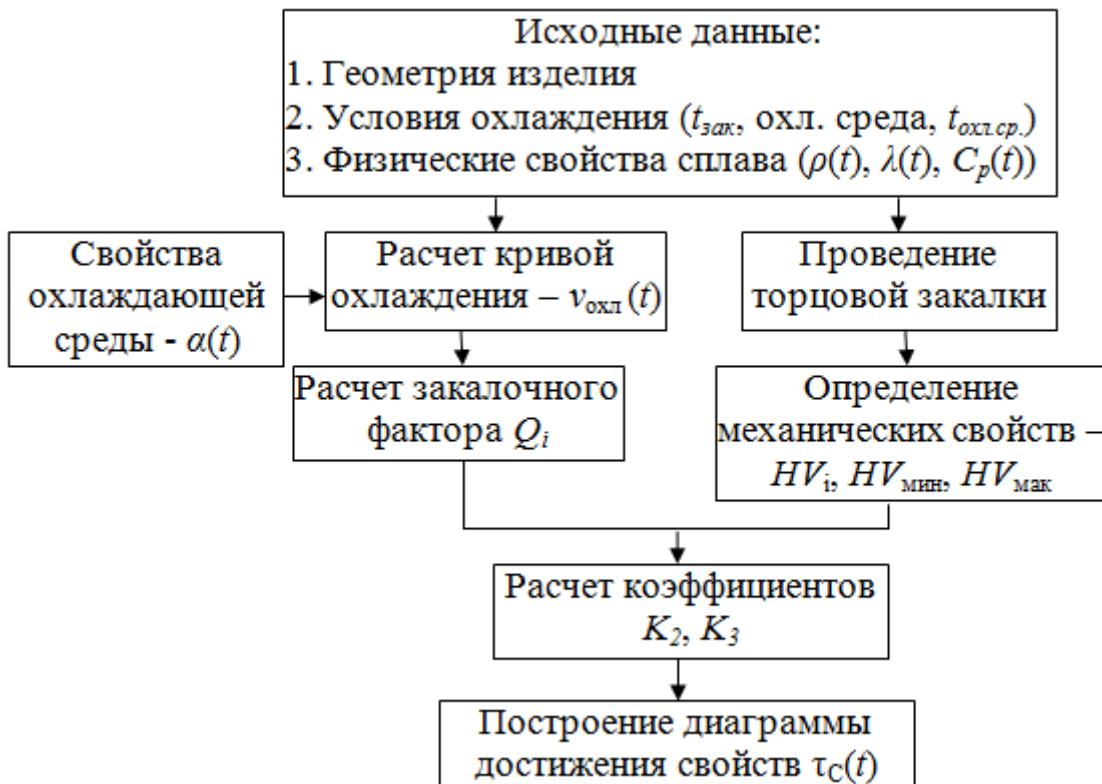
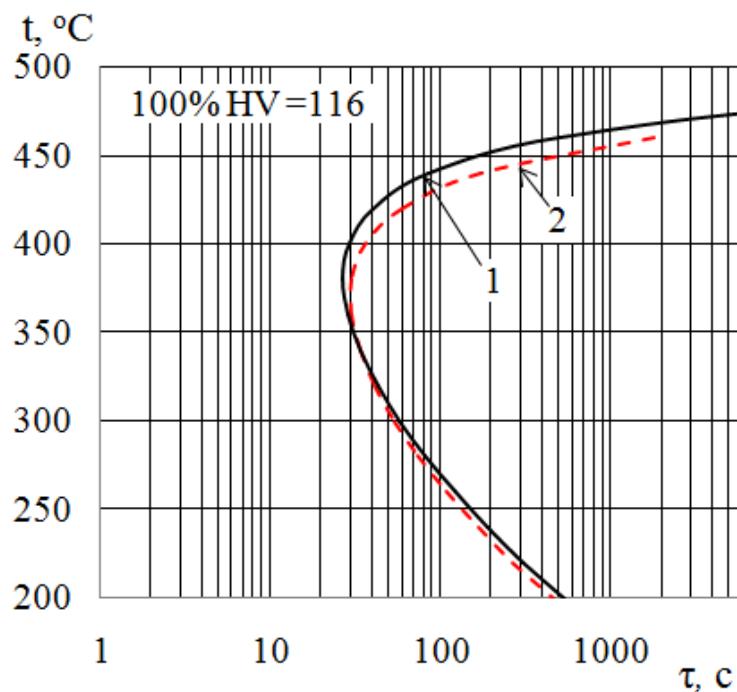


Рис. 5. Блок-схема построения С-кривой достижения свойств методом торцовой закалки



С-кривые построены с применением: 1 – метода торцовой закалки;
2 – метода изотермической закалки

Рис. 6. С-кривые достижения 95% твердости сплава В-1341

В шестой главе приведены результаты исследований коррозионной стойкости в 0,04 и 0,4% водном растворе NaCl деформируемого термически упрочняемого (закаленного и искусственно состаренного) алюминиевого сплава В-1341 в зависимости от длительности выдержки при изотермической закалке.

Просвечивающая электронная микроскопия, результаты которой приведены ранее, показала, что при изотермической выдержке в сплаве образуются речные выделения анодной β' -фазы, растворение которой в процессе электрохимической коррозии приводит к появлению электрохимических надрезов и структурного питтинга (Рис. 7).

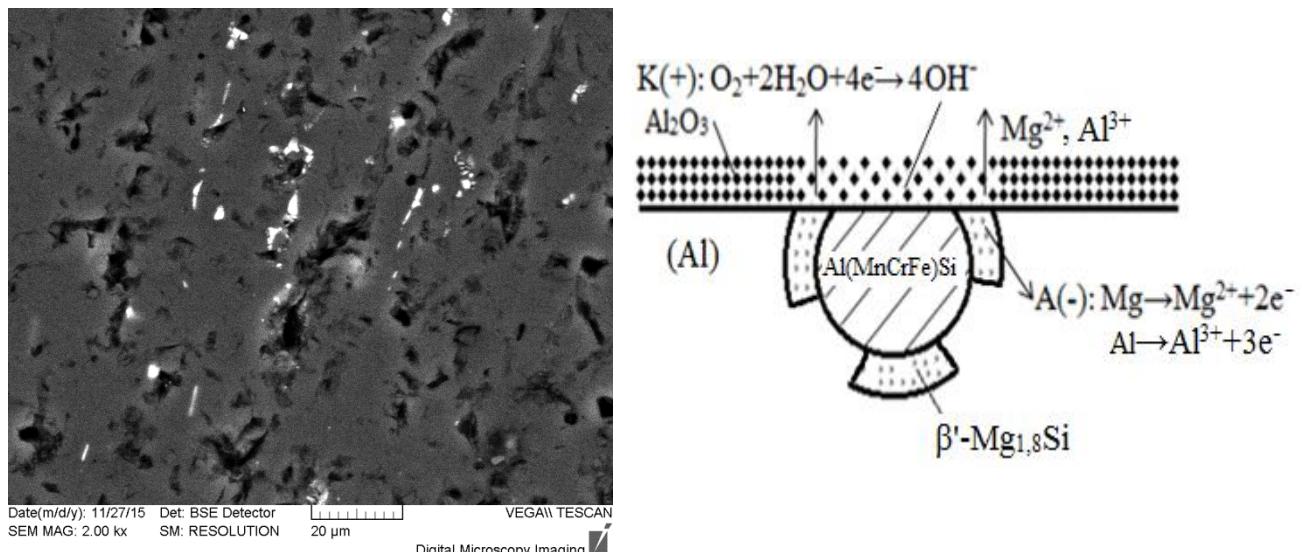
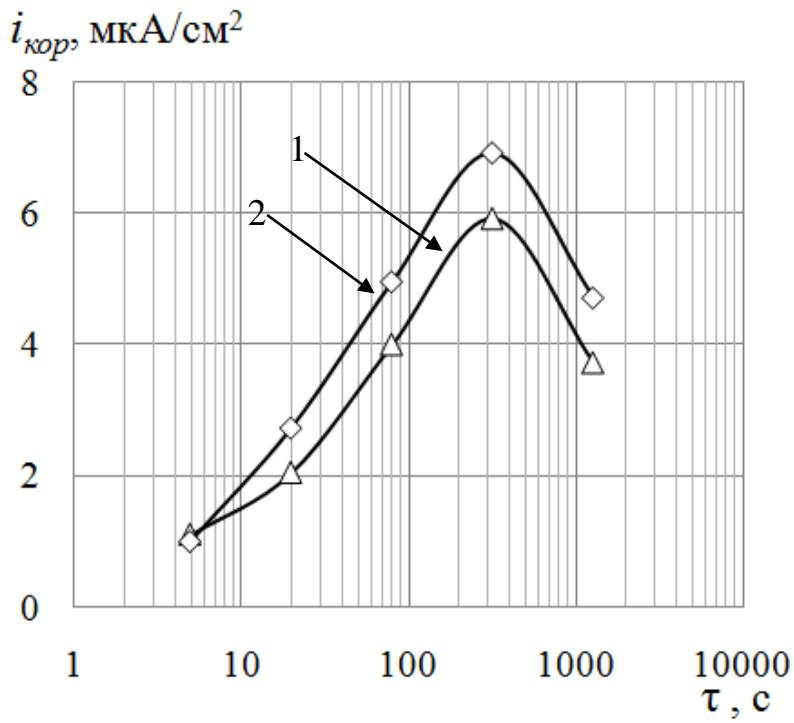


Рис. 7. Микроструктура после глубокого травления (а) и схема гальванической пары (б) на поверхности сплава

Потенциометрическим методом выявлена способность сплава к самопассивации. Потенциодинамическим и металлографическим методами показано, что наиболее низкую склонность к питтинговой коррозии имеют образцы с минимальной продолжительностью выдержки при изотермической закалке.

Потенциодинамическим методом и методом импедансной электрохимической спектроскопии был установлен экстремальный характер зависимости плотности коррозионного тока от продолжительности изотермической выдержки (Рис. 8). Максимальная плотность коррозионного тока при продолжительности изотермической выдержки 320 с связана вероятно с максимальной площадью поверхности анодных выделений β' -фазы, образующихся при этих условиях.

С использованием уравнений электрохимической коррозии, теории кристаллизации и кинетики роста включений получена математическая зависимость плотности коррозионного тока от продолжительности выдержки при изотермической закалке, позволившая без заметного отклонения аппроксимировать полученные экспериментальные данные (Рис 8).



Температура изотермической выдержки: 1 – 300 °C; 2 – 350 °C
 Рис. 8. Влияние продолжительности изотермической выдержки на плотность коррозионного тока сплава B-1341 в 0,4 % водном растворе NaCl

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние продолжительности выдержки при изотермической закалке на состав и морфологию продуктов распада твердого раствора сплава B-1341. Показано, что при изотермической выдержке при распаде твердого раствора сначала на поверхности дисперсиона, а затем в твердом растворе, образуются и растут крупные стержневые кристаллы β' -фазы, являющиеся структурными концентраторами напряжений. Увеличение продолжительности изотермической выдержки приводит к снижению пересыщения твердого раствора легирующими элементами и вакансиями, что приводит к уменьшению доли когерентной мелкодисперсной упрочняющей β'' -фазы, а также увеличению ширины зоны свободной от выделений.
2. Экспериментальным и расчетным методами показано, что уравнение Колмогорова корректнее, чем уравнение Остина-Риккетса описывает кинетику превращений в процессе охлаждения при закалке сплава B-1341. Точность прогнозирования прочности и твердости увеличивается при правильном подборе степенного показателя n в уравнении Колмогорова и коэффициентов K_4 (равного температуре сольвуса β -фазы), K_5 (равного энергии активации диффузии в пересыщенном вакансиями сплаве системы Al-Mg-Si). При прогнозировании свойств изделий из сплава B-1341 рекомендуется значения: $n = 1,5$; $K_4 = 798$ K; $K_5 = 55960$ Дж/моль.
3. Методами изотермической и торцовой закалки построены С-кривые достижения свойств (временного сопротивления, предела текучести, твердости, относительного удлинения) сплава B-1341, которые облегчают

разработку и внедрение режимов термической обработки изделий из данного сплава.

4. Установлено, что кристаллы β' -фазы, образующиеся при замедленном охлаждении преимущественно на дисперсоиде, являясь анодной фазой, растворяются при электрохимической коррозии, приводя к появлению структурного питтинга. Потенциодинамическим методом и методом электрохимической импедансной спектроскопии показано, что зависимость скорости коррозии от продолжительности выдержки при изотермической закалке имеет экстремальный характер.
5. Разработана научно обоснованная, использующая фундаментальные уравнения теории коррозии, кристаллизации и диффузионного массопереноса, математическая модель, позволяющая прогнозировать влияния режимов охлаждения на скорость коррозии дисперсионно-упрочняемых сплавов.
6. Впервые предложена расчетно-экспериментальная экспресс-методика с применением метода торцовой закалки, позволяющая снизить трудоемкость построения С-кривых достижения свойств дисперсионно-упрочняемых сплавов в 2 – 3 раза.
7. Разработанная методика позволяет увеличить точность прогнозирования временного сопротивления, предела текучести и твердости на 10-15 % и упрощает процесс выбора режимов охлаждения при закалке, снижая затраты на стадии подготовки производства изделий. Данная методика может быть рекомендована для фасонных изделий из сплава В-1341 и других деформируемых термически упрочняемых сплавов системы Al-Mg-Si.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Пучков Ю.А., Фам Хонг Фу. Построение диаграмм достижения свойств термически упрочняемых алюминиевых сплавов методом торцовой закалки // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 3. С. 33-38.
2. Пучков Ю. А., Фам Х. Ф. Исследование влияния режимов изотермической закалки на коррозионные свойства термически упрочненных алюминиевых сплавов // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2015. № 10. URL. <http://technomag.bmstu.ru/doc/820293.html>.
3. Пучков Ю.А., Фам Хонг Фу. Влияние режимов охлаждения при закалке на структуру и свойства сплавов системы Al–Mg–Si // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 4. С. 37-42.
4. Пучков Ю. А., Фам Хонг Фу. Влияние режимов термической обработки на коррозионные свойства алюминиевого сплава В-1341 // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2016. № 2. С. 125-133.
5. Фам Хонг Фу. Прогнозирование конструкционной прочности термоупрочняемых деталей из алюминиевого сплава В-1341 // Будущее машиностроения России: Сб. тез. докл. Пятой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М., 2012. С. 91.

6. Фам Хонг Фу. Расчетно-экспериментальный метод построения диаграмм достижения свойств термически упрочняемых алюминиевых сплавов по данным торцовой закалки // Будущее машиностроения России: Сб. тез. докл. Седьмой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М., 2014. С. 123.
7. Фам Хонг Фу. Прогнозирование коррозионных свойств изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов // Будущее машиностроения России: Сб. тез. докл. Восьмой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М., 2015. С. 147.
8. Фам Х. Ф. Прогнозирование механических свойств термически упрочненных алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si // XXVII Международная Инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов. Сб. тез. докл. М., 2015. С. 11.
9. Фам Х. Ф. Прогнозирование механических свойств деталей из термически упрочненных алюминиевых сплавов с помощью диаграммы достижения свойств // Вьетнамо-российская международная научная конференция. Сб. тез. докл. Ханой, 2015. С. 92.