

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](http://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 штампуемость, 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 торцевой 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 торцевой 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 торцевой 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 рисунок 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 торцевой 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 %  $\text{NaNO}_3$  + 45 %  $\text{NaNO}_2$ . При закалке образцы помещали в соляную ванну первой печи с температурой 530 °С 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 °С, 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

Торцевую закалку проводили на специальной установке, состоящей из бака емкостью 0,050 м<sup>3</sup> 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 °С) в камерной печи, подвешивали над соплом, расстояние от торца образца до сопла составляло 20 мм. Закалку проводили в воде с температурой 20 °С. Старение при 170 °С 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 LMN 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.

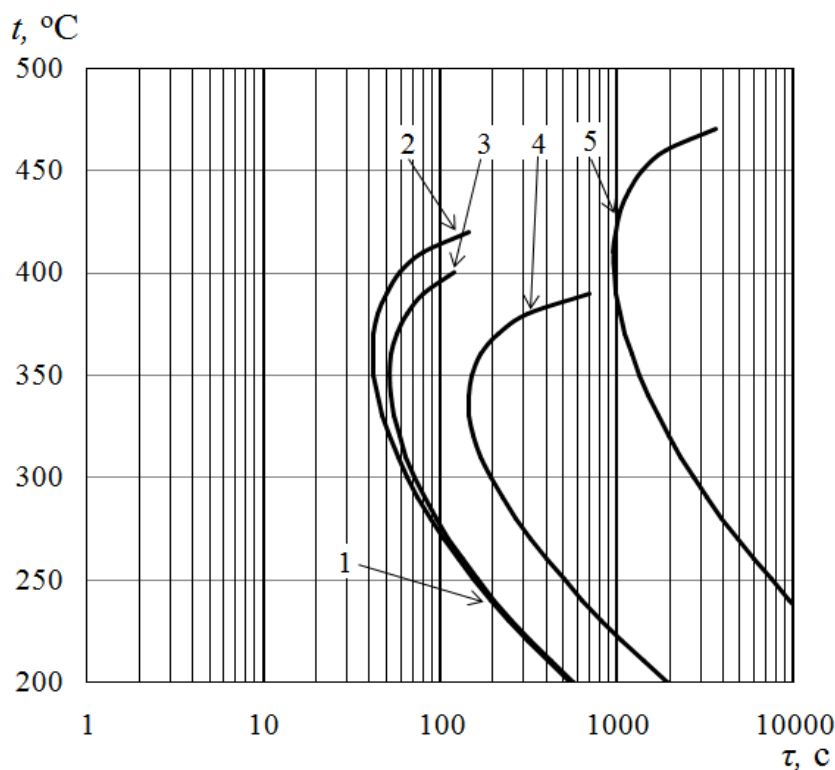
Для оценки случайной погрешности измерений определяли среднеквадратичное отклонение  $S$ . Уровень доверительной вероятности  $\alpha$  принимали равным 0,95. Величину доверительного интервала определяли по уравнению:

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

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  $\beta''$ -фаза ( $\text{Al}_2\text{Mg}_5\text{Si}_4$ ), метастабильная полуккогерентная  $\beta'$ -фаза ( $\text{Mg}_{1,8}\text{Si}$ ), медьсодержащая  $Q$ -фаза ( $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ ), а также стабильная некогерентная  $\beta$ -фаза ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ) (Рис. 1, Таблица 2).



1 – ЗГП, 2 –  $\beta''$ -фаза, 3 –  $\beta'$ -фаза; 4 –  $Q$ -фаза; 5 –  $\beta$ -фаза ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ )

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 - $\beta''$ -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 - $\beta'$ -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 - $\beta$ -фаза	$Mg_2Si$ , пластинчатые (некогерентные)	Fm3m $a=0,6354$

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

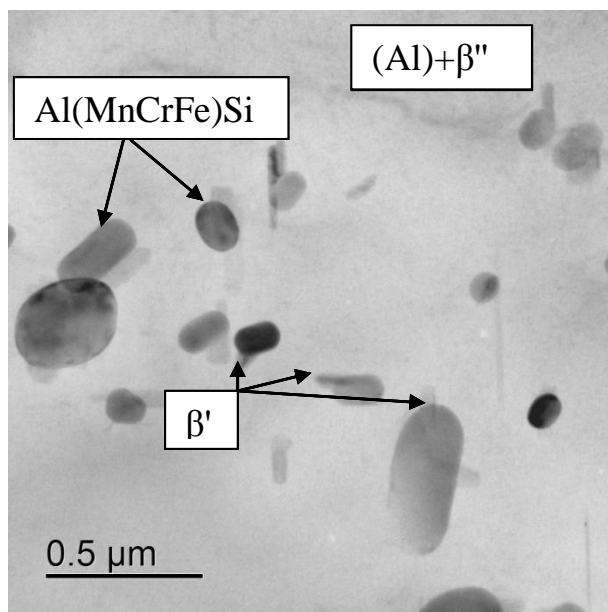
Методом электронной просвечивающей микроскопии показано, что при небольшой продолжительности (5 с) изотермической выдержки на поверхности дисперсоида образуются реечные выделения (Рис. 2).

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

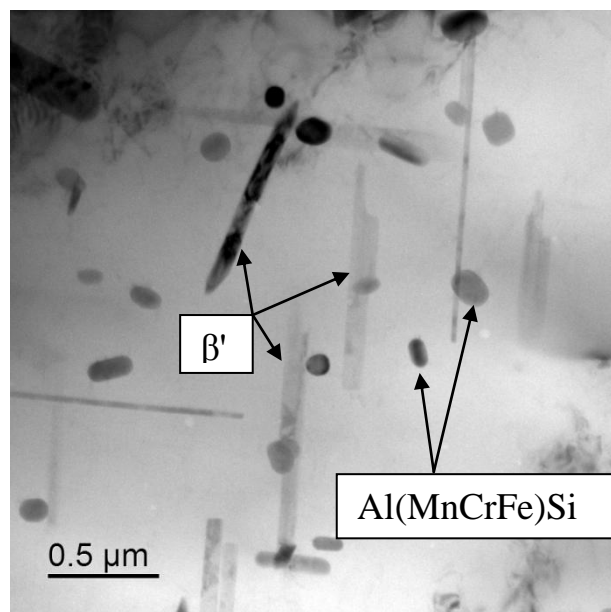
С увеличением продолжительности выдержки при изотермической закалке длина реек увеличивается от 100...200 до 500...1000 нм, вокруг границ зерен и реек увеличивается ширина зоны свободной от выделений  $\beta''$ -фазы; в отдельных местах наблюдается срастание реек, ведущее к появлению пластин (Рис. 2б).

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

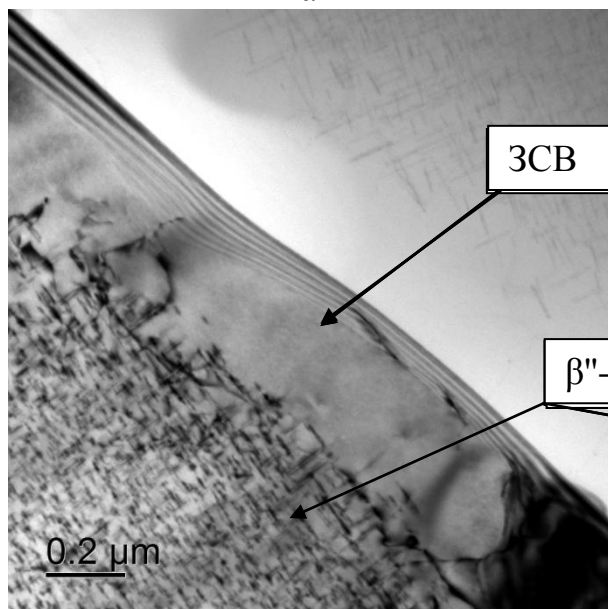




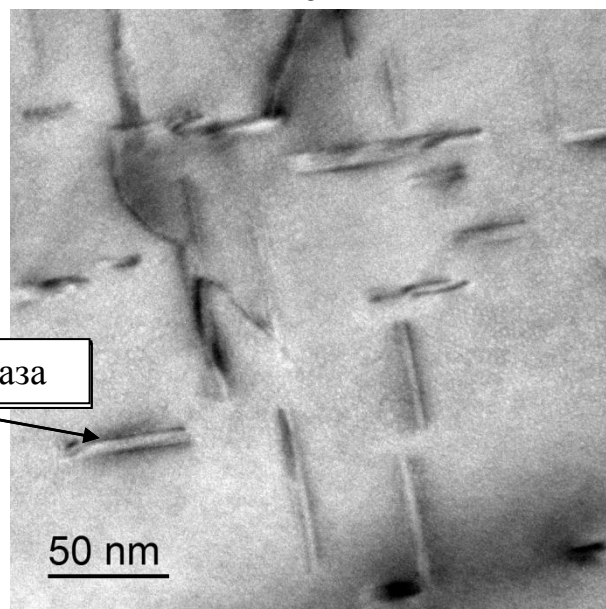
а



б



в



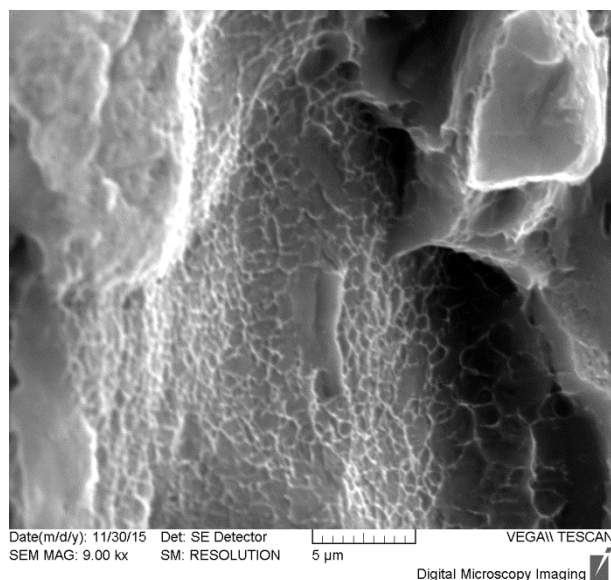
г

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

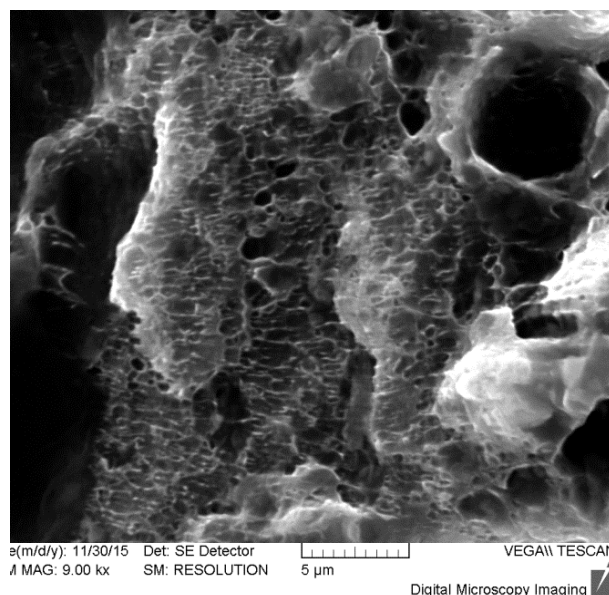
а - 5 с; б - 1280 с; в, г - 80 с

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 речечной  $\beta'$ -фазы и об уменьшении участия в процессе разрушения сплава мелкодисперсных упрочняющих стержневых когерентных включений  $\beta''$ -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  $\times 9000$ , при печати  $\times 1250$ )

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  $\beta''$ -фазы в  $\beta'$ -фазу. Второй локальный максимум при температурах от 430 до 470 °С соответствует превращению  $\beta'$ -фазы в  $\beta$ -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  $\beta''$ -фазы при увеличении продолжительности изотермической выдержки. (Таблица 3).

Таблица 3.

Механические характеристики сплава В-1341 и тепловые эффекты  $\Delta H$  от фазовых превращений при нагреве образцов

Режим изотермической выдержки		$\Delta H$ , мДж/г		$\sigma_{0,2}$ , МПа	HV 20	$\delta$ , %
$\tau$ , 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 °С. 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  $\beta$ - 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  $\beta$ -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-Риккета 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).

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

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

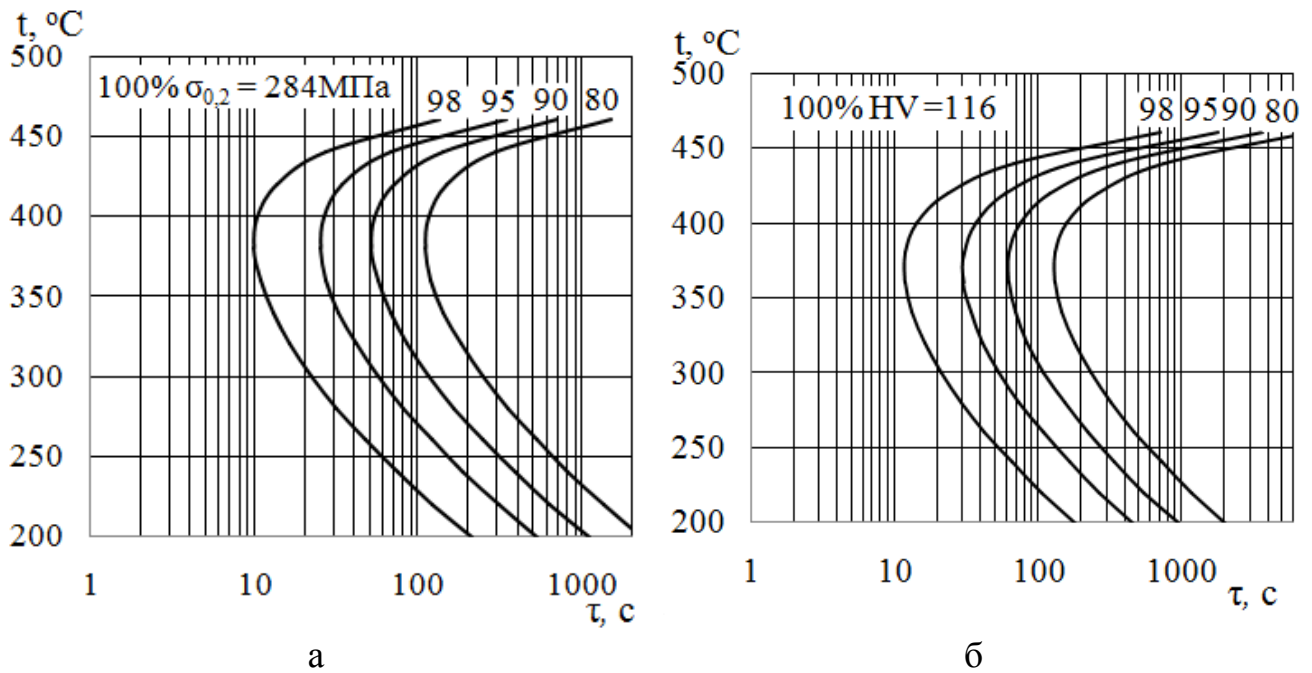


Рис. 4. С-кривые достижения 98, 95, 90, 80 % предела текучести (а) и твердости (б) сплава В-1341, построенные методом изотермической закалки

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

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

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

где  $\sigma_{\text{мак}}$  и  $HV_{\text{мак}}$  - максимальное значение предела текучести и твердости сплава после старения;  $\sigma_{\text{мин}}$  и  $HV_{\text{мин}}$  - 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 охлаждающих средах

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

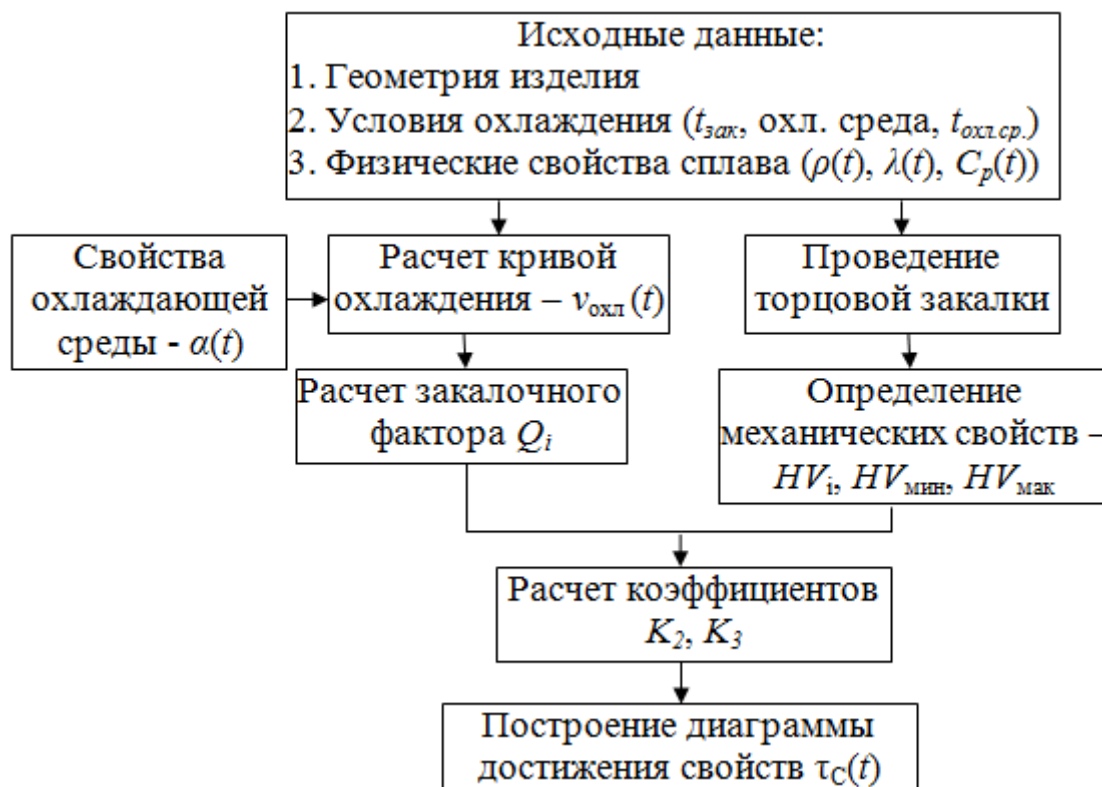
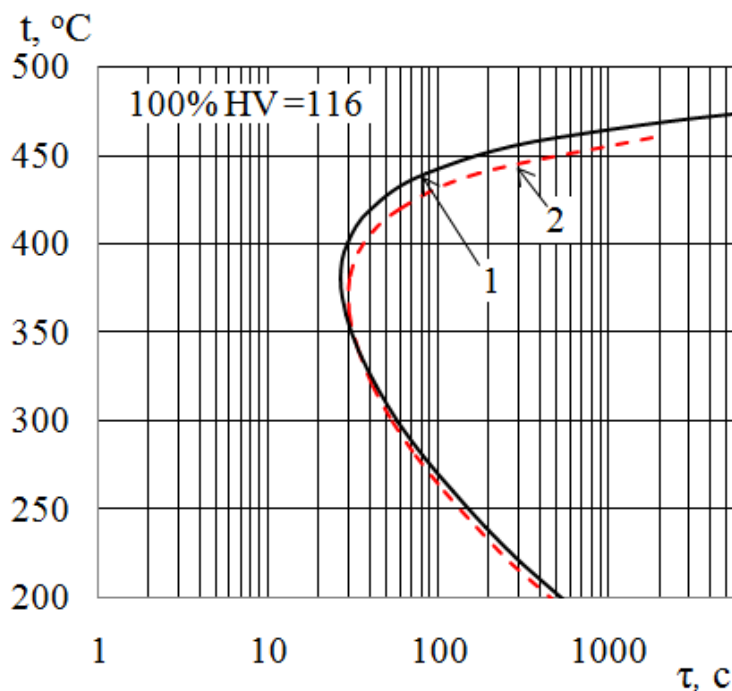


Рис. 5. Блок-схема построения С-кривой достижения свойств методом торцевой закалки



С-кривые построены с применением: 1 – метода торцевой 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 речечные выделения анодной  $\beta'$ -фазы, растворение которой в процессе электрохимической коррозии приводит к появлению электрохимических надрезов и структурного питтинга (Рис. 7).

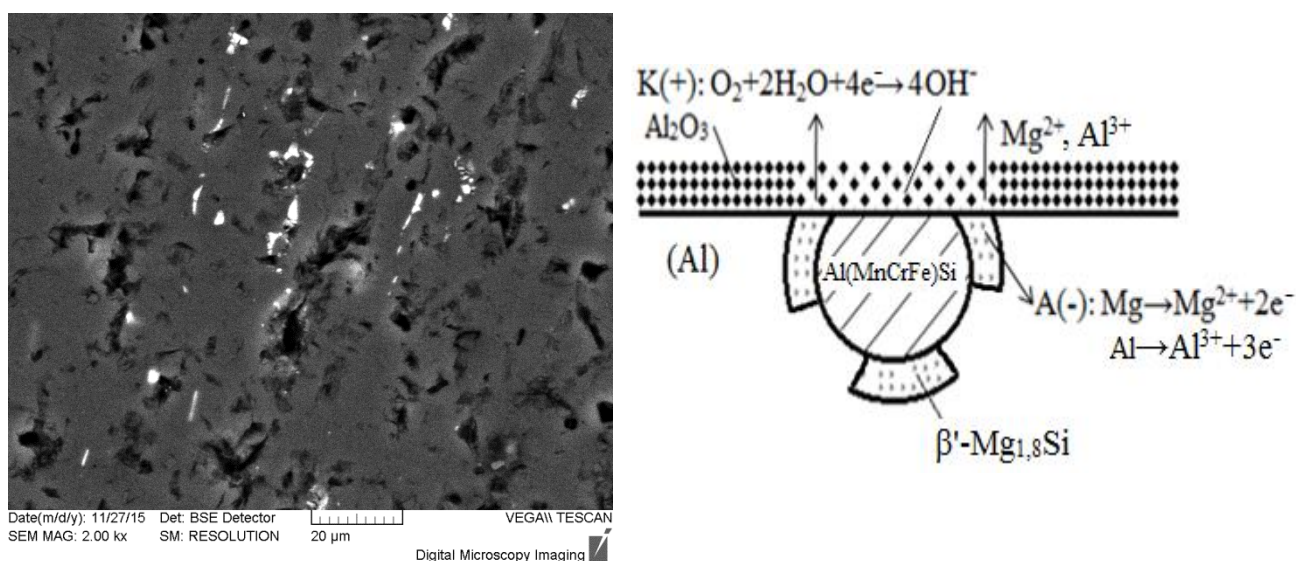


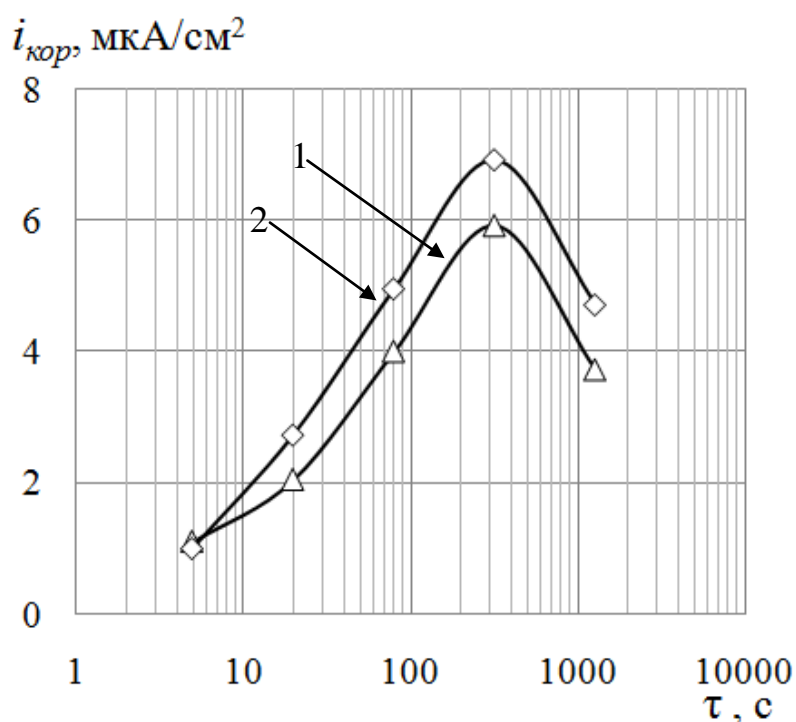
Рис. 7. Микроструктура после глубокого травления (а) и схема гальванической пары (б) на поверхности сплава

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  $\beta'$ -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 °С; 2 – 350 °С  
 Рис. 8. Влияние продолжительности изотермической выдержки на плотность коррозионного тока сплава В-1341 в 0,4 % водном растворе NaCl

### ОБЩИЕ ВЫВООДЫ

1. Исследовано влияние продолжительности выдержки при изотермической закалке на состав и морфологию продуктов распада твердого раствора сплава В-1341. Показано, что при изотермической выдержке при распаде твердого раствора сначала на поверхности дисперсоида, 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-Риккета описывает кинетику превращений в процессе охлаждения при закалке сплава В-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 В-1341 рекомендуется значения:  $n = 1,5$ ;  $K_4 = 798$  К;  $K_5 = 55960$  Дж/моль.
3. Методами изотермической и торцевой закалки построены С-кривые достижения свойств (временного сопротивления, предела текучести, твердости, относительного удлинения) сплава В-1341, которые облегчают



разработку и внедрение режимов термической обработки изделий из данного сплава.

4. Установлено, что кристаллы  $\beta'$ -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 торцевой 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 торцевой 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 торцевой 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.