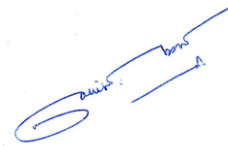


На правах рукописи



ВАЙ ЯН МИН ХТЕТ

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СТАЛЕЙ И  
СПЛАВОВ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ ВЫСОКОГО  
ДАВЛЕНИЯ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2024

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

Научный руководитель: **Шевченко Светлана Юрьевна**, к.т.н  
доцент кафедры материаловедения  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Петрова Лариса Георгиевна**  
доктор технических наук, профессор  
заведующая кафедрой технологии  
конструкционных материалов Московского  
автомобильно- дорожного государственного  
технического университета (МАДИ)  
**Удод Кирилл Анатольевич**  
кандидат технических наук, доцент  
Главный специалист отдела по исследованиям  
и разработкам Инженерно-технологического  
центра АО «Выксунский металлургический  
завод»

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

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г. в \_\_\_\_\_ на заседании  
диссертационного совета 24.2.331.01 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:  
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просим  
высылать в двух экземплярах по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте  
МГТУ им. Н.Э. Баумана [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Телефон для справок: 8(499) 267-09-63

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Плохих Андрей Иванович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** Газовая закалка с нагревом в вакуумных печах имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной закалкой в жидких средах, такие как возможность регулирования интенсивности закалки путем контроля давления и скорости газа; обеспечение безокислительного нагрева; снижение структурных напряжений и напряжений, вызванных неравномерностью охлаждения; отсутствие необходимости промывки деталей, очистки стоков, затрат на утилизацию отработанной закалочной среды и окалины; экологическая чистота процесса.

Бериллиевые бронзы и железоникелевые сплавы широко применяются для изготовления упругих чувствительных элементов приборов, они являются парамагнитными, что важно для обеспечения точности работы приборов вблизи магнитных полей. Бериллиевые бронзы также имеют высокую температурную стабильность предела упругости. Использование газовой закалки обеспечивает более высокое качество термической обработки этих сплавов. Однако в литературе практически отсутствуют справочные данные об охлаждающей способности газовых сред. Поэтому задача экспериментального определения температурных зависимостей коэффициента теплоотдачи газовых сред является актуальной. Эти зависимости необходимы для моделирования закалочного охлаждения деталей и оценки возможности закалки деталей из пружинных дисперсионно-твердеющих сплавов в газовых средах высокого давления.

**Целью данной работы** является управление распределением структуры и свойств по объему изделий из пружинных дисперсионно-твердеющих сплавов с помощью методики и программных средств, позволяющих прогнозировать результаты закалки в азоте высокого давления.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать методику экспериментального определения коэффициента теплоотдачи газовых закалочных сред в процессе закалочного охлаждения и модернизировать конструкцию датчика охлаждающей способности.

2. Исследовать влияние технологических факторов (давление, интенсивность циркуляции газа) на характер температурных зависимостей коэффициента теплоотдачи азота высокого давления.

3. Разработать методику определения возможности закалки деталей в азоте высокого давления на основе прогнозирования структуры и свойств в объеме деталей.

4. Представить практические рекомендации по выбору параметров газовых закалочных сред для охлаждения деталей из пружинного дисперсионно-твердеющего сплава БрБ2.

5. Установить влияние закалки в азоте высокого давления на механизмы упрочнения прецизионного сплава 36НХТЮ в процессе старения.

### **Научная новизна.**

1. Разработана основанная на применении модели теплообмена квадратной призмы с охлаждающей средой методика определения коэффициента теплоотдачи азота высокого давления в зависимости от температуры используемого для закалки инертного газа, его давления, а также скорости циркуляции.

2. Впервые установлено на основе теоретических расчетов, что после полной термической обработки (закалка в потоке инертного газа и искусственное старение) дисперсионно-твердеющего прецизионного сплава 36НХТЮ его свойства – прочность и твердость - преимущественно определяются способностью когерентных частиц интерметаллидов типа  $Ni_3(Al, Ti)$  сопротивляться срезу при движении дислокаций под нагрузкой.

### **Практическая значимость.**

1. Создан расчетно-экспериментальный комплекс для оценки охлаждающей способности газовых закалочных сред и прогнозирования свойств закаленных деталей, включающий в себя датчик модернизированной конструкции, систему регистрации сигналов датчика, модели для расчета коэффициента теплоотдачи закалочных сред, тепловых полей и распределения твердости в закаливаемых деталях.

2. Разработаны практические рекомендации по выбору параметров газовых закалочных сред для охлаждения деталей из сталей и дисперсионно-твердеющих сплавов.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Способ расчета коэффициента теплоотдачи газовых сред с помощью датчика призматической формы и методика моделирования закалочного охлаждения сталей в азоте высокого давления.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния закалки в азоте высокого давления на структуру и свойства пружинных сплавов БрБ2 и 36НХТЮ.

**Методы исследования.** При выполнении работы использованы современные методы исследования структуры и свойств материалов: металлографический анализ; определение микротвердости и условного предела упругости по методу Рахштадта-Штремеля; статические испытания на растяжение, рентгенофазовый анализ; моделирование закалочного охлаждения в программе ANSYS.

**Достоверность** полученных результатов и выводов в диссертационной работе обеспечена использованием высокоточного оборудования, применением современных методов исследований и испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ и международных стандартов, а также апробацией результатов работы.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на 4 конференциях, семинарах и форумах, в том числе: X и XII всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2017, 2019 г.), XV Всероссийская конференция «ТестМат» (г. Москва, 2023 г.), Международная конференция «Моделирование в инженерном деле» (г. Москва, 2023 г.).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 6 научных работ, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 работа в журнале, индексируемом Scopus и Web of Science, 3 доклада в сборниках трудов конференций.

**Личный вклад автора.** Вошедшие в диссертацию результаты получены автором под научным руководством кандидата технических наук Шевченко Светланы Юрьевны. Совместно с научным руководителем автор участвовал в постановке цели и задач исследования. Диссертантом лично выполнены обоснование направления исследования по материалам анализа научно-технической и патентной литературы; исследования закалочного охлаждения сталей и дисперсионно-твердеющих сплавов, анализ экспериментальных и расчетных кривых охлаждения сталей и сплавов, исследование микроструктуры, измерение микротвердости, определение механических свойств.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 104 страницы, включая 54 рисунок, 13 таблиц, 25 формул.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность исследований диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, определены ее научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, описаны структура и объем диссертации.

**В первой главе** представлен обзор научно-технической литературы, посвященной закалочному охлаждению в газовых средах особенностям структурообразования в бериллиевой бронзе и железоникелевых пружинных сплавах при закалке и старении.

При газовой закалке определяющими факторами являются физические свойства газа, давление газа и его скорость относительно детали. Необходимо учитывать экономическую целесообразность: обычно используют давление газа от 6 до 10 бар. Конструкция печи накладывает ограничения на скорость потока газа.

Пружинные сплавы являются одним из важнейших классов конструкционных материалов. В зависимости от условий работы и назначения такие сплавы должны обладать различными свойствами. Прежде всего, они должны обладать стандартными для всех конструкционных материалов характеристиками – прочностью, пластичностью и вязкостью. К специальным свойствам в первую очередь относится высокое сопротивление малым пластическим деформациям при статическом и циклическом нагружении. В некоторых случаях к пружинным сплавам также предъявляются требования по коррозионной стойкости, магнитным свойствам, тепловому расширению, контактному сопротивлению и другим.

Бериллиевые бронзы характеризуются высокими пределами упругости, временным сопротивлением, твердостью и коррозионной стойкостью в сочетании с повышенными сопротивлениями усталости, ползучести и износу. Также они являются теплостойкими материалами, устойчивыми при температурах до 310...340 °С. При 500 °С они имеют приблизительно такое же временное сопротивление, как оловянно-фосфористые и алюминиевые бронзы при комнатной температуре. Поэтому закалка бериллиевых бронз имеет большое значение как в процессе их производства, так и в процессе изготовления из них изделий, прежде всего в качестве промежуточной обработки для повышения пластичности и деформируемости бронз при холодной прокатке или штамповке, а также для достижения высокого упрочнения при последующем старении.

Дисперсионно-твердеющие сплавы имеют широкие возможности для улучшения свойств. К железоникелевым пружинным сплавам типа 36НХТЮ предъявляют очень высокие требования по точности химического состава, по структуре и свойствам. Однако для сплавов этой группы в литературе нет данных, по которым можно было бы выбрать оптимальные режимы термической обработки (например, термокинетических диаграмм). Существующие режимы обработки, указанные в стандартах на материал, основаны на экспериментальных результатах.

По результатам обзора научно-технической литературы сформулированы цель и задачи работы.

**Во второй главе** приведены объекты и методы исследований, используемое оборудование.

Приведены чертежи датчиков охлаждающей способности двух типов. Приведен химический состав и размеры образцов из дисперсионно-твердеющих сплавов БрБ2 и 36НХТЮ. Приведены чертежи деталей из легированных сталей

ШХ15СГ, 7ХЗ, 30Х13, 40Х13, 25Х5МФ, для которых проводили моделирование закалочного охлаждения.

Закалка в азоте была проведена в универсальной вакуумной установке 10.0VPT–4020/24N производства фирмы SECO/WARWICK. Для сравнения проводили закалку в воде. Нагрев образцов под закалку в воде и старение проводили в лабораторной печи СНОЛ 1.6.2.5.1/9-И5 и МПЛ-6. Режимы термической обработки образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Режимы термической обработки образцов

Сплав	Вид ТО	Температура, °С	Время нагрева и выдержки, мин	Охлаждающая среда
БрБ2	Закалка	785	100	азот, 0,73 МПа
		780	15	вода
	Старение	340	120	воздух
36НХТЮ	Закалка	950	120	азот, $p = 0,4$ МПа азот, $p = 0,55$ МПа азот, $p = 0,73$ МПа
		950	15	вода
	Старение	675	15 - 270	воздух

Приготовление микрошлифов для металлографических исследований осуществляли на оборудовании для пробоподготовки фирмы Struers по стандартной методике. Травление образцов из сплава БрБ2 после закалки проводили в растворе, содержащем 5 г хлорного железа ( $\text{FeCl}_3$ ), 50 мл соляной кислоты ( $\text{HCl}$ ) и 100 мл воды; после старения травление образцов проводили электрохимическим способом в 12%-ном водном растворе щавелевой кислоты при напряжении 7 В в течение 15 с. Травление образцов из сплава 36НХТЮ проводили в растворе Марбле: 20 г  $\text{CuSO}_4$ , 100 мл  $\text{HCl}$ , 100 мл  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ . Перед испытанием на определение условного предела упругости образцы были подвергнуты электролитическому полированию в реактиве 80 % ортофосфорной кислоты ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) и 20 % хромового ангидрида ( $\text{CrO}_3$ ) при напряжении 20 В и силе тока 6 А.

Микроструктуру сплавов изучали с помощью светового микроскопа Olympus GX51 при увеличении до 500 крат. Обработку изображений проводили с помощью программы SIAMS 700. Дополнительное исследование микроструктуры образцов из сплава 36НХТЮ проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Hitachi SU3500 в ПАО «Туполев».

Измерение микротвердости проводили по ГОСТ 9450-76 на микротвердомере DuraScan 70. Для образцов БрБ2 нагрузка составляла 0,25 Н, для 36НХТЮ - 2 Н.

Для испытаний на растяжение использовали пропорциональные плоские образцы без головок по ГОСТ 11701-84 с размерами  $b_0 = 12,5$  мм,  $l_0 = 48$  мм,  $l = 60$  мм,  $h = 45$  мм и  $L = 150$  мм. Испытания проведены на установке Electropuls E10000 в лаборатории исследования свойств материалов МГТУ «СТАНКИН».

Условный предел упругости с допуском на остаточную деформацию 0,002 % и 0,005 % определяли на образцах размером  $10 \times 100$  мм, подвергнутых закалке (в азоте и в воде) и последующему старению.

Испытания проводили по методу Рахштадта-Штремеля на специальной установке в соответствии с ОСТ 4.054.035-78. Этот метод основан на последовательном нагружении образцов продольным изгибом при условии постепенного увеличения действующего напряжения и замере деформации после разгрузки. Измерение остаточного прогиба образцов после цикла нагрузка-разгрузка осуществляется контактным способом с помощью индикатора часового типа КПМ 2.729004 с точностью 0,001 мм.

Рентгеноструктурный фазовый анализ сплава 36НХТЮ проводили на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advanced в  $\text{CoK}\alpha$ -излучении и интервале углов дифракции 25...130 градусов с шагом 0,07 градуса и экспозицией 1,5 с в точке. Регистрацию дифрактограмм проводили на базе лаборатории исследования наноматериалов и порошковых материалов ВНИИНМ имени А. А. Бочвара. Расшифровку дифрактограмм проводили с помощью программного обеспечения PANalytical HighScore Plus и базы данных Crystallography Open Database.

Рентгеноструктурный фазовый анализ образцов из сплава БрБ2 проводили на рентгеновском дифрактометре PANalytical Empyrean Series 2 с использованием монохроматизированного  $\text{CuK}\alpha$  излучения ( $1,54178 \text{ \AA}$ ). Анализ фазового состава проводили при помощи программного обеспечения PANalytical High Score Plus и базы данных ICDD PDF-2 в лаборатории исследования свойств материалов МГТУ «СТАНКИН».

Исследование микроструктуры и химического состава образцов из сплава 36НХТЮ проведено на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCAN VEGA3 LMN со встроенным энергодисперсионным анализатором Quantax EDX.

**В третьей главе** модернизирована конструкция призматического датчика для определения коэффициента теплоотдачи закалочных сред, разработанного Д.В. Будриным. Проведен расчет, который дал возможность минимизировать размеры датчика. Было установлено, что отношение длины призмы к ее толщине 5:1 избыточно, достаточным же является соотношение 3:1. Эскиз корпуса модернизированного датчика представлен на рисунке 1.



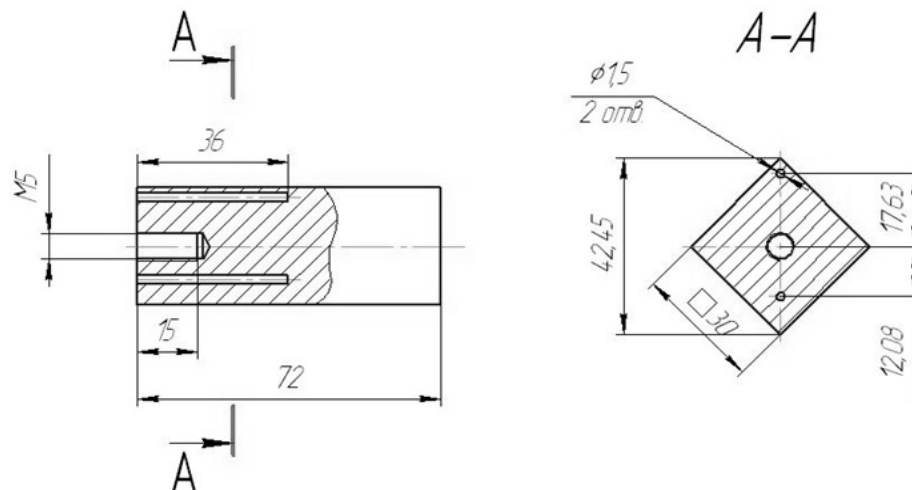


Рисунок 1. Корпус призматического датчика для определения коэффициента теплоотдачи закалочных сред

Коэффициент теплоотдачи по результатам испытания призматического датчика рассчитывают по формуле:

$$\alpha = \frac{m \cdot c \cdot (t_{M2} - t_{M1})}{F \cdot \left( \frac{t_{П1} + t_{П2}}{2} - t_{окр} \right) \cdot \Delta \tau},$$

где  $m$  – масса охлаждаемого образца, кг;  $t_{M1}$  и  $t_{M2}$  – средняя температура массы образца в начале и в конце расчетного интервала, °C;  $c$  – средняя теплоемкость образца в интервале температур  $t_{M1} - t_{M2}$ , Дж/(кг·°C);  $F$  – поверхность охлаждаемого образца, м²;  $t_{П1}$  и  $t_{П2}$  – средняя температура поверхности образца в начале и в конце расчетного интервала, °C;  $t_{окр}$  – температура окружающей (закалочной) среды, °C;  $\Delta \tau$  – длительность расчетного интервала, с. Результаты расчета коэффициента теплоотдачи азота высокого давления приведены на рисунке 2.

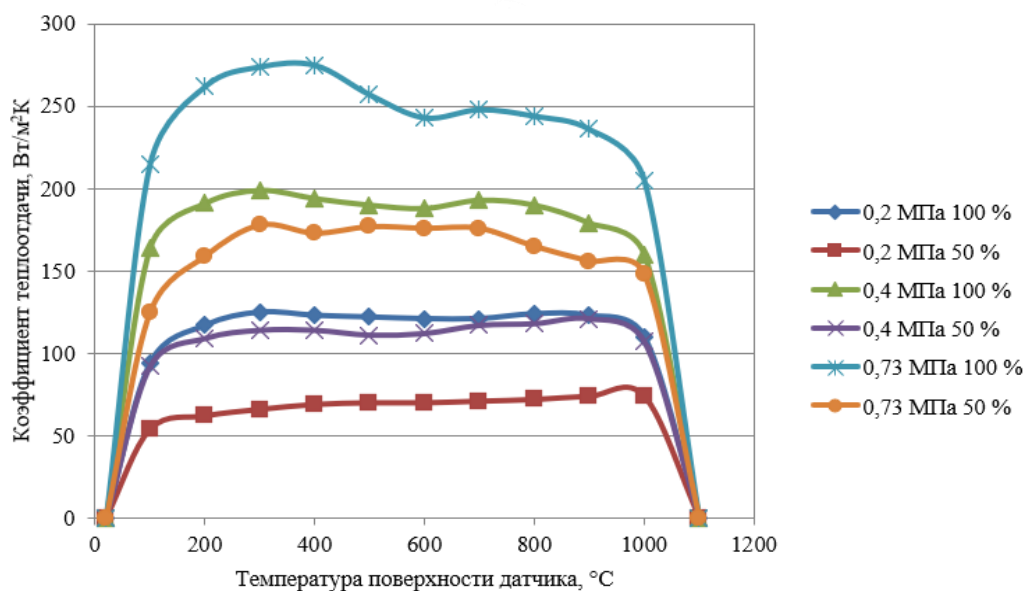


Рисунок 2. Коэффициент теплоотдачи азота при различном давлении и режимах вращения ротора турбины на дверце печи (50 и 100 % мощности)

Для проверки адекватности расчетов коэффициента теплоотдачи использовали деталь – шестерню из стали ВКС-5. В программном комплексе Autodesk Inventor создали модель детали (рисунок 3, а). Расчет тепловых полей проводили в программе ANSYS Workbench. В качестве граничных условий задавали температурную зависимость коэффициента теплоотдачи азота при давлении 0,4 МПа. Проводили закалочное охлаждение шестерни с размещенными в ней термопарами по тому же режиму и регистрировали кривые охлаждения. Экспериментальные и расчетные кривые охлаждения практически совпадают (рисунок. 3 б), что говорит об адекватности полученных зависимостей.

Экспериментально определенные температурные зависимости коэффициента теплоотдачи закалочных сред необходимы для моделирования закалочного охлаждения деталей. Рассчитав кривые охлаждения в центре и на поверхности деталей и наложив их на термокинетические диаграммы соответствующих сталей, можно оценить возможность заковки деталей в той или иной закалочной среде. Было выполнено моделирование заковки в азоте высокого давления следующих деталей: кольцо из стали ШХ15СГ, направляющая из сталей 7Х3 и 30Х13, плита из сталей 7Х3 и 25Х5МФ, тормозные диски из стали 40Х13. Для моделирования закалочного охлаждения создавали 3D модели деталей в программе AutoCAD и проводили тепловые расчеты в программе ANSYS Workbench.

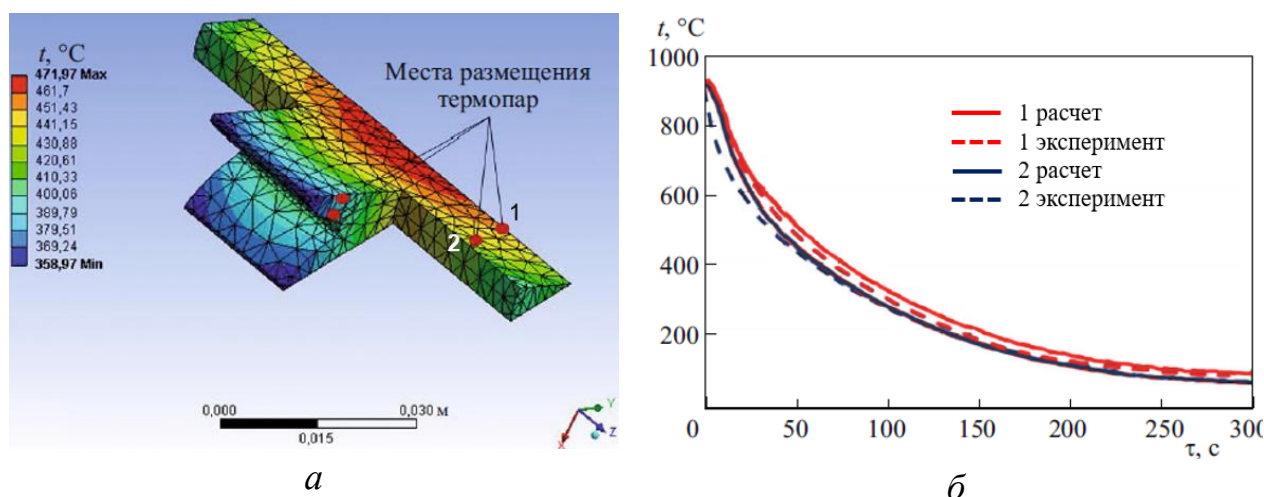


Рисунок 3. Тепловые поля в шестерне (закалка в азоте с давлением 0,4 МПа при 100 % мощности ротора турбины) в момент времени 140 с (а), экспериментальные и расчетные кривые охлаждения точек в сердцевине шестерни (1) и вблизи поверхности ступицы (2) (б)

По результатам моделирования была определена возможность заковки плиты из стали 25Х5МФ ( $\varnothing 350 \times 55$ ) и пакета тормозных дисков из стали 40Х13 ( $\varnothing 258 \times \varnothing 159 \times 3$ , в пакете 15 дисков) в азоте с давлением 0,73 МПа в вакуумной печи 10.0VPT-4020/24N. Расчетные кривые охлаждения сердцевины и поверхности деталей, наложенные на термокинетические диаграммы соответствующих сталей, приведены на рисунке 4.

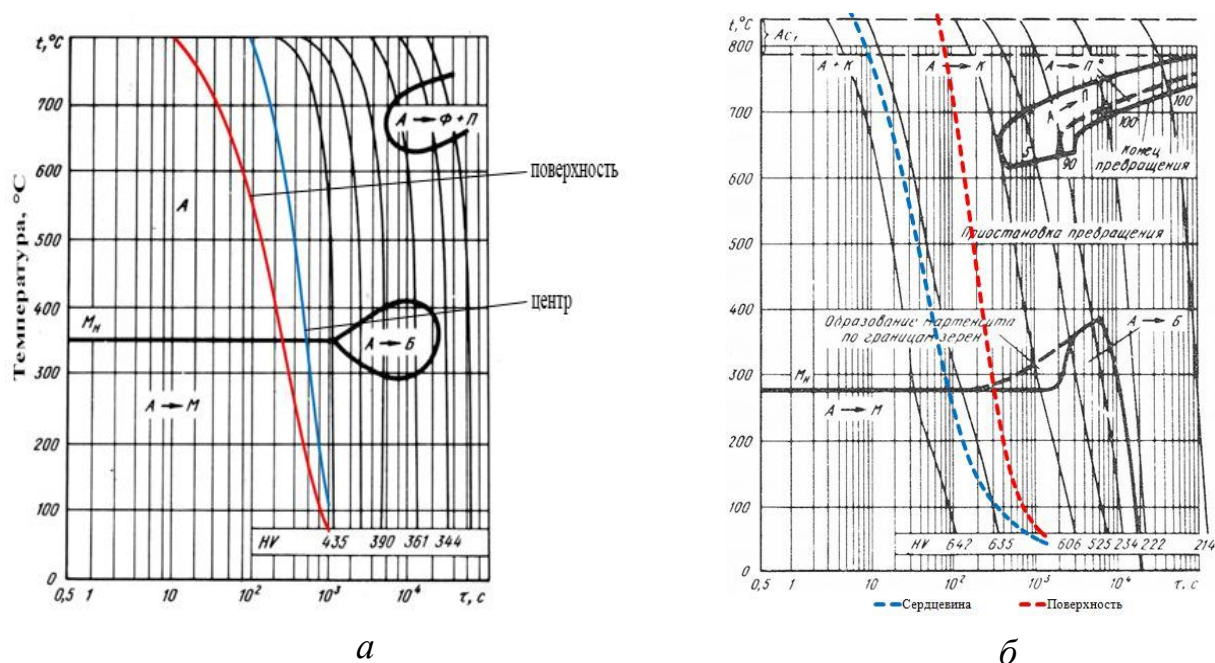


Рисунок 4. Расчетные кривые охлаждения сердцевины и поверхности деталей: а) плиты из стали 25X5МФ; б) пакета тормозных дисков из стали 40X13

В четвертой главе исследовано влияние закалки в азоте высокого давления на структуру и свойства бериллиевой бронзы БрБ2.

Результаты измерения микротвердости БрБ2 приведены на рисунке 5. Результаты подтверждают данные микроструктурных исследований – твёрдость образцов в исходном состоянии мало отличается от твёрдости после закалки в газе. Твёрдость ленты толщиной 0,5 мм после закалки в воде ниже, чем после закалки в газе из-за более высокой скорости охлаждения и выделения меньшего количества  $\beta$ -фазы. Твёрдость образцов после закалки в воде и старения выше, чем после закалки в газе и старения из-за большего пересыщения твёрдого раствора.

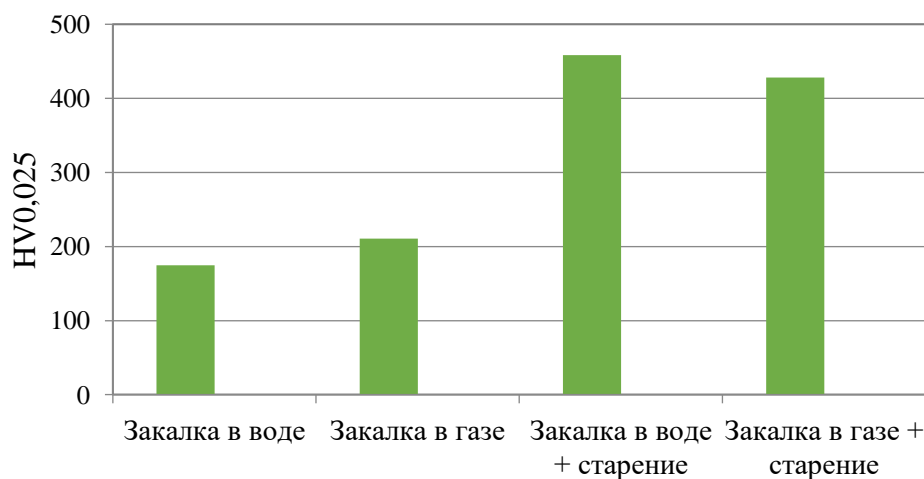


Рисунок 5. Микротвердость образцов из БрБ2 толщиной 0,5 мм

Было проведено моделирование закалочного охлаждения рулонов ленты из бериллиевой бронзы различной толщины. Экспериментальные и расчетные кривые охлаждения центра рулона толщиной 15 мм практически совпадают. Результаты моделирования охлаждения рулонов с другими геометрическими размерами показали, что кривая охлаждения центра рулона толщиной 5 мм проходит по границе областей I (образование пересыщенного твердого раствора) и II (пограничный распад) термокинетической диаграммы, следовательно, 5 мм - максимальная толщина рулона, обеспечивающая закалку ленты из БрБ2 с получением однофазного твердого раствора.

Сравнение расчетных и экспериментальных кривых охлаждения, которые были наложены на термокинетическую диаграмму превращений  $\alpha$ -твердого раствора, приведено на рисунке 6.

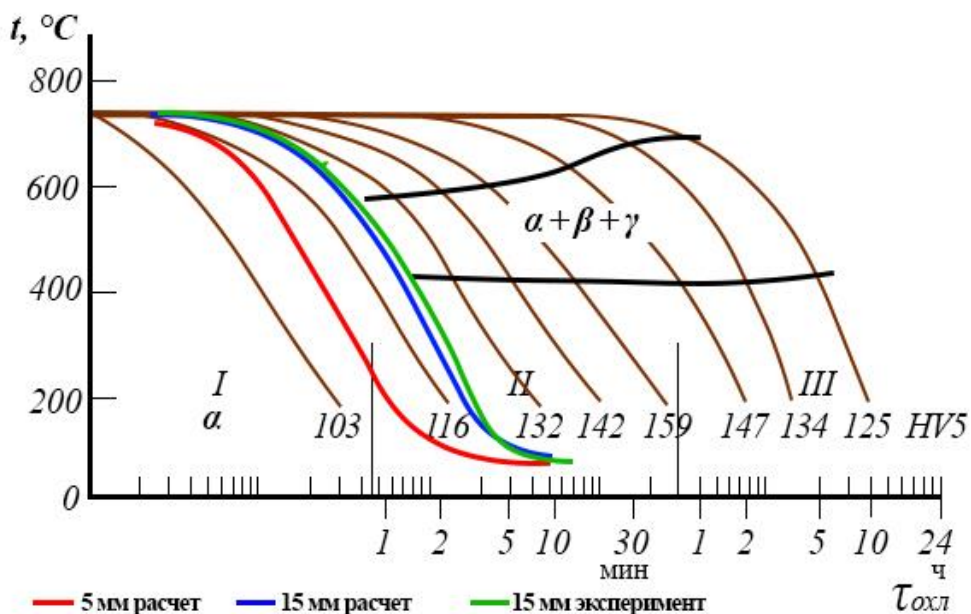


Рисунок 6. Расчетные и экспериментальные кривые охлаждения в центре рулонов из сплава БрБ2: I - образование пересыщенного твердого раствора; II - пограничный распад; III - общее выделение промежуточных фаз

На рисунке 7 приведена номограмма для выбора режима закалочного охлаждения бронзы БрБ2 при известных размерах садки.

**В пятой главе** разработаны режимы закалки прецизионных железоникелевых сплавов в азоте высокого давления. Микроструктура образцов из сплава 36НХТЮ после закалки в воде и в азоте с различным давлением (от 0,44 до 0,73 МПа) практически не отличается и представляет собой аустенит с равноосным зерном. Характер старения образцов, закаленных в азоте и воде, существенно различается (рисунок 8).



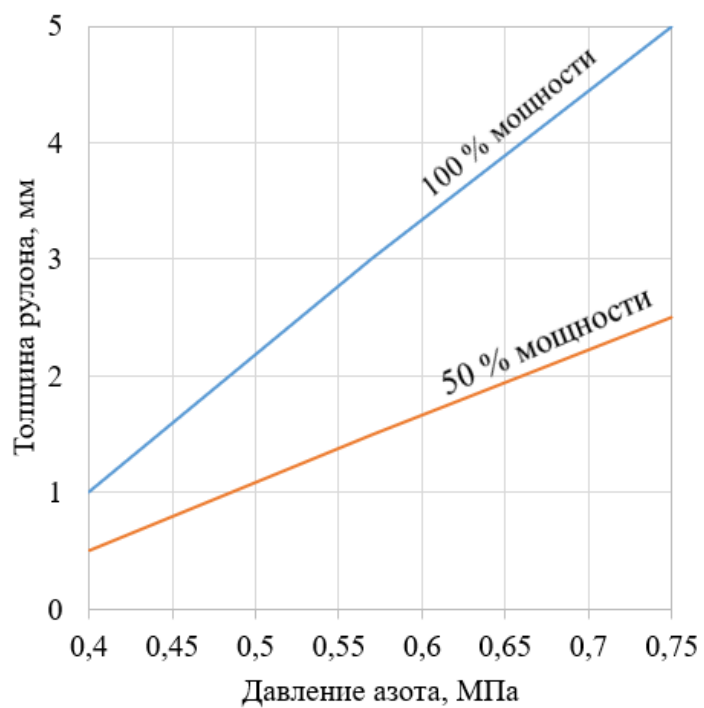
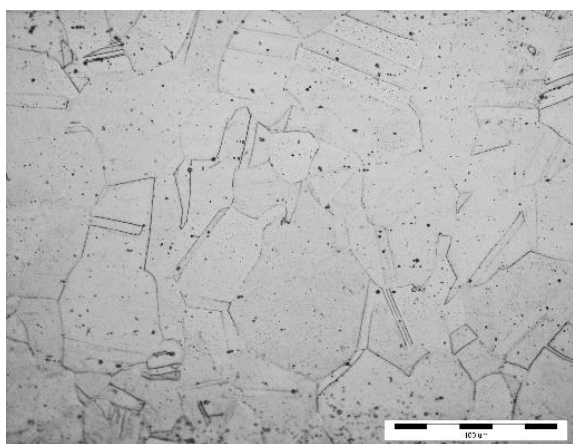
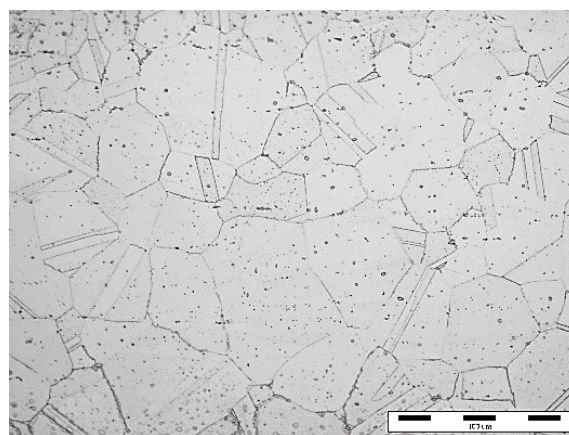


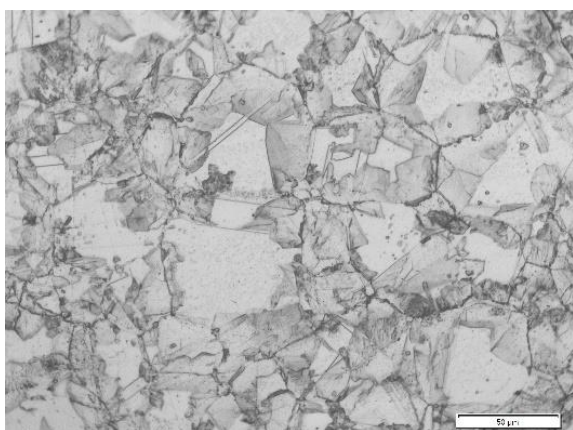
Рисунок 7. Номограмма для выбора режима закалочного охлаждения рулонов из бронзы БрБ2 при 50 и 100 % мощности ротора турбины



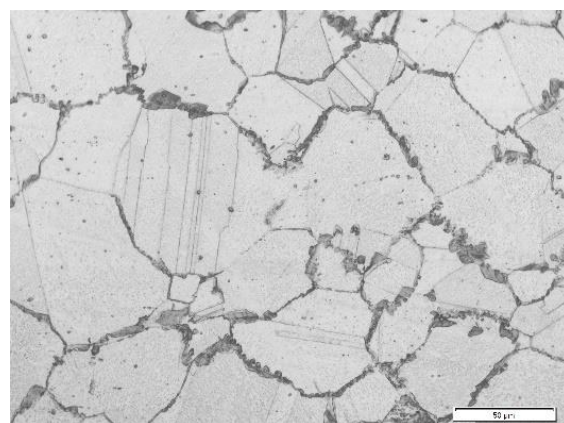
а



б



в



г

Рисунок 8. Микроструктура образцов 36НХТЮ после: а) закалки в воде, б) закалки в азоте  $p = 0,55$  МПа; в) закалки в воде и старения 4 ч; г) закалки в азоте  $p = 0,55$  МПа и старения 4 ч

По границам зерен твердого раствора наблюдаются области прерывистого распада - темные выделения  $\gamma'$ -фазы. Площадь зон с прерывистым распадом после закалки в воде и различной продолжительности старения значительно больше, чем после закалки в газе с теми же режимами старения. Количественная оценка площади зон прерывистого распада  $\gamma'$ -фазы представлена в таблице 2. Наименьшую площадь областей с прерывистым распадом твердого раствора имеет образец после газовой закалки при  $p = 0,55$  МПа.

Таблица 2. Доля площади, занятая зонами прерывистого распада, %

Охлаждающая среда	Продолжительность старения		
	90 мин	120 мин	240 мин
Азот, $p = 4$ атм	32	33	21
Азот, $p = 5,5$ атм	19	20	19
Азот, $p = 7,3$ атм	15	17	25
Вода	44	47	44

Гистограммы с результатами измерений пределов текучести и упругости представлены на рисунке 9. Наибольшие пределы прочности и текучести показали образцы после закалки в воде, а также в азоте с давлением 0,4 МПа (рисунок 9, а). Это может быть связано с большей долей прерывистого распада при старении, в ходе которого большая часть  $\gamma'$ -фазы выделяется по границам зерна и эффективно упрочняет их. Однако в случае выраженного прерывистого распада наблюдается снижение пределов упругости (рисунок 9, б). Это можно объяснить тем, что дислокации практически не встречают препятствий в виде упрочняющей фазы в теле зерна. Режимы с закалкой в газе характеризуются высоким показателем условного предела упругости примерно одинакового численного значения для всех режимов. Это является следствием активного протекания процесса непрерывного распада при старении, что затрудняет упругое смещение атомов из положений равновесия в кристаллической решетке и скольжение дислокаций.

Было проведено моделирование упрочнения, вызванного образованием частиц  $\gamma'$ -фазы вследствие непрерывного и прерывистого распада. На сканирующем электронном микроскопе были получены изображения микроструктур сплава после различных режимов старения (примеры представлены на рисунке 10). Были определены размеры частиц  $\gamma'$ -фазы в зонах прерывистого распада и расстояние между ними (таблица 3).

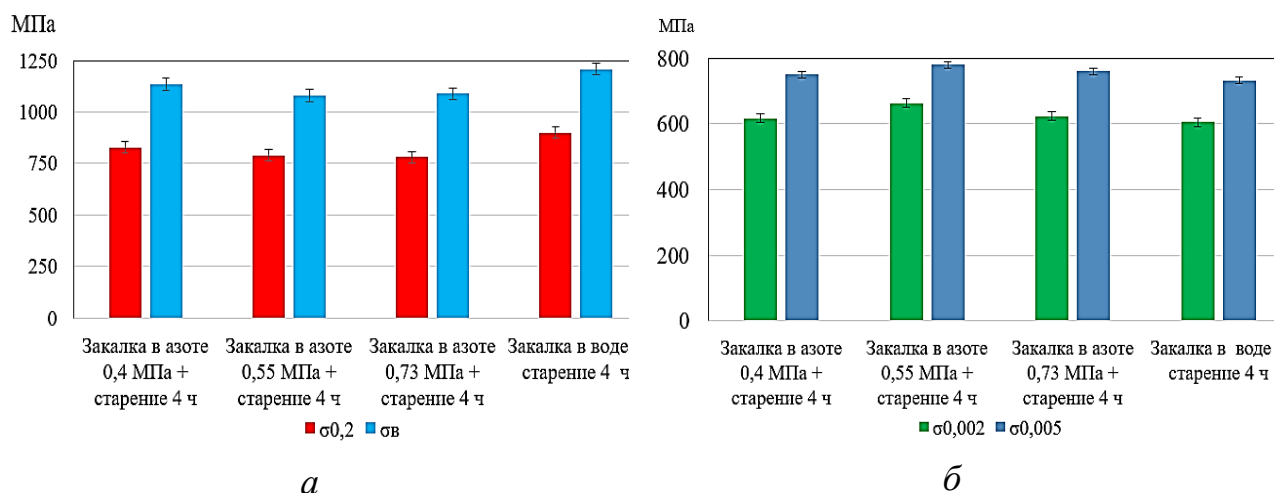


Рисунок 9. Пределы текучести и прочности (а), условные пределы упругости (б) сплава 36НХТЮ после термообработки

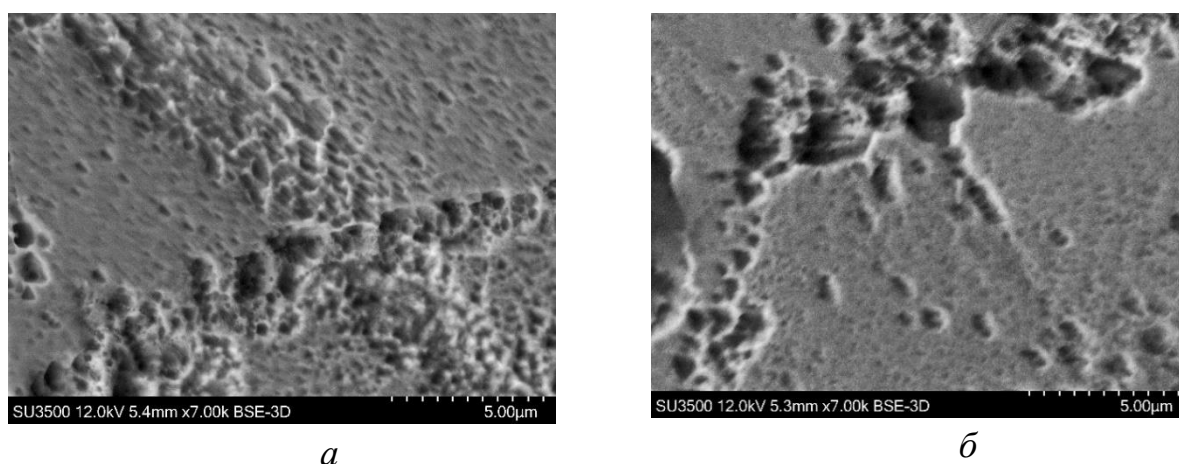


Рисунок 10. Микроструктуры сплава 36НХТЮ после закалки и старения:  
а – закалка в воде и старение при 675 °С 90 минут; б – закалка в азоте с давлением 0,44 МПа и старение при 675 °С 90 минут

Таблица 3. Параметры частиц  $\gamma'$ -фазы в зависимости от режима старения

Охлажда- ющая среда	Продолжительность старения								
	90 мин			150 мин			240 мин		
	Размер частиц, мкм	Расстояние между частицами, мкм	Доля час- тиц	Размер частиц, мкм	Расстояние между частицами, мкм	Доля час- тиц	Размер частиц, мкм	Расстояние между частицами, мкм	Доля час- тиц
Азот 0,4 МПа	0,94	1,08	0,59	0,76	1,52	0,48	0,61	1,92	0,46
Азот 0,55 МПа	0,47	1,86	0,30	0,45	1,64	0,30	0,45	1,56	0,29
Азот 0,73 МПа	0,37	1,62	0,27	0,32	1,50	0,25	0,34	1,43	0,24
Вода	0,53	1,21	0,47	0,52	1,25	0,46	0,51	1,32	0,43

При расчете упрочнения, вызванного выделением частиц  $\gamma'$ -фазы вследствие прерывистого распада, использовали известные из научной литературы модели Мотта-Набарро, Орована и Келли. Расчет упрочнения при непрерывном распаде проводили по моделям Мотта-Набарро, сопротивления дисперсных частиц движению дислокаций и Келли. По значениям напряжений сдвига рассчитывали нормальные напряжения. Сопоставление упрочнения, вызванного образованием частиц  $\gamma'$ -фазы при прерывистом и непрерывном распаде, с пределом текучести образцов после закалки в различных средах и старения, приведено на рисунке 11. Упрочнение, вызванное непрерывным распадом хорошо коррелирует с пределом упругости образцов (рисунок 11, а), а упрочнение, вызванное прерывистым распадом - с пределом текучести (рисунок 10, б). Следовательно, модели Мотта-Набарро, Орована, Келли и др. довольно хорошо описывают изменение твердости и прочности в процессе старения сплава. Упрочнение после закалки в газе преимущественно обусловлено когерентными выделениями со средним размером 0,45 мкм. Указанные выделения, в основном, работают на срез.

Таким образом, закалка в азоте с давлением 0,5...0,73 МПа обеспечивает наименьший вклад прерывистого упрочнения в общий уровень прочности сплава и меньшее его отрицательное влияние на предел упругости. Предел упругости после такой закалки на 10 % превышают пределы упругости после закалки в воде и закалки в азоте с низким давлением (0,4 МПа).

По формуле Тайбора была рассчитана твердость сплава 36НХТЮ после закалки и различных режимов старения. Расчетные и экспериментальные значения твердости образцов, закаленных в воде и азоте с давлением 0,55 МПа, приведены на рисунке 12. Расчетные и экспериментальные значения микротвердости совпадают, что показывает адекватность расчета прочностных свойств сплава 36НХТЮ с помощью известных моделей упрочнения.

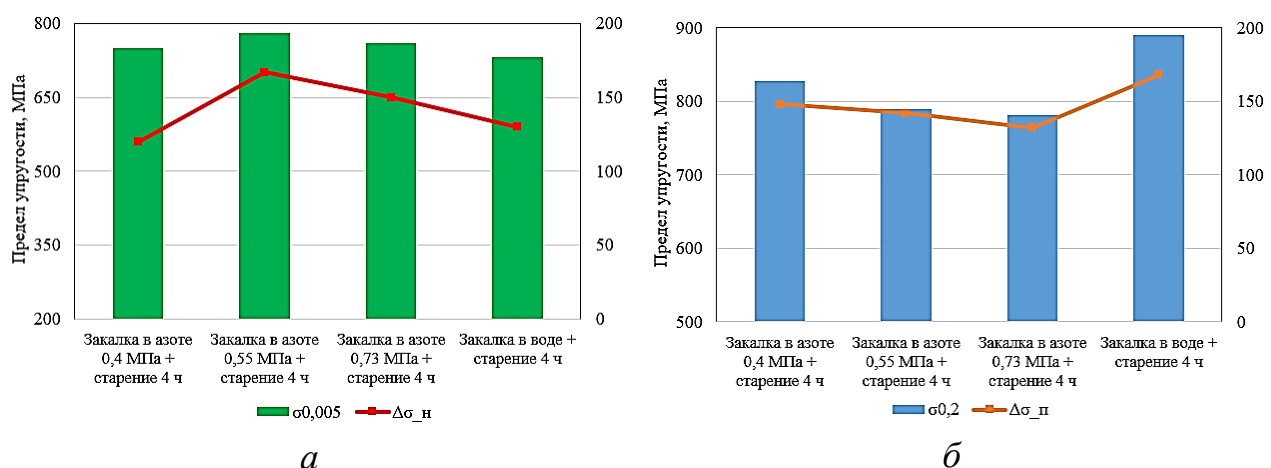


Рисунок 11. Сопоставление предела упругости с упрочнением, вызванным непрерывным распадом (а) и предела текучести с упрочнением, вызванным прерывистым распадом (б)



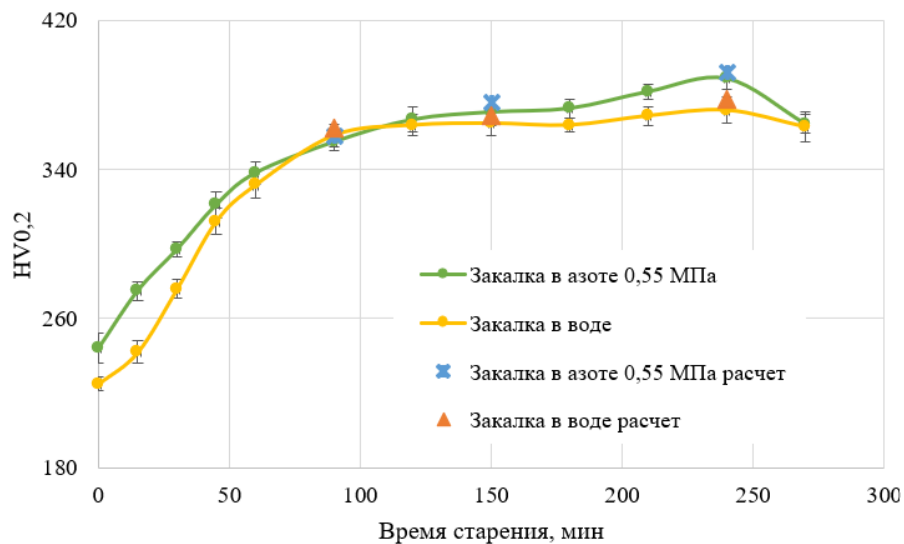


Рисунок 12. Экспериментальные кинетические кривые твердости образцов из сплава 36НХТЮ и расчетные значения твердости для времени старения 90, 150 и 240 мин

### Основные выводы по работе

1. Разработана методика экспериментального определения коэффициента теплоотдачи газовых закалочных сред в процессе закалочного охлаждения и модернизирована конструкция датчика охлаждающей способности.
2. Исследовано влияние технологических факторов на характер температурных зависимостей коэффициента теплоотдачи азота высокого давления. Получена серия температурных зависимостей коэффициента теплоотдачи в широком интервале режимов закалочного охлаждения в печи SECO/WARWICK 10.0VPT–4020/24N.
3. Разработана методика моделирования закалочного охлаждения с использованием экспериментальных зависимостей коэффициента теплоотдачи газовых сред, которая позволяет устранить необходимость экспериментальной проверки возможности закалки и сократить затраты при отработке технологии закалки конкретных изделий в потоке газа высокого давления в вакуумных печах.
4. Впервые установлено, что для прецизионных пружинных сплавов БрБ2 и 36НХТЮ применение газовой закалки является возможным и перспективным способом термической обработки. Показано, что после закалки бериллиевой бронзы в азоте можно получить такие же механические свойства, как после закалки в воде. Посредством моделирования закалочного охлаждения сплава БрБ2 определена предельная толщина рулона из ленты, который можно закаливать на однофазный твердый раствор в азоте с максимальным давлением и максимальной интенсивностью циркуляции газа. Построена номограмма, позволяющая выбрать режим закалочного охлаждения при известных размерах садки.

5. Показано, что закалка сплава 36НХТЮ в азоте с давлением 0,55...0,73 МПа позволяет частично подавить прерывистый распад твердого раствора при старении и повысить упругие свойства сплава на 10 %. Проведено моделирование упрочнения сплава при старении. Использование известных моделей упрочнения позволило установить, что повышение предела упругости дисперсионно-твердеющего пружинного сплава 36НХТЮ при старении после газовой закалки преимущественно обусловлено противодействием интерметаллидных частиц срезом дислокациями.

### **Основные публикации по теме диссертации**

1. Comparative evaluation of methods for the determination of heat transfer coefficients of liquid and gaseous quenching media / Wai Yan Min Htet [и др.]// Mechanics and industry. 2017. V. 18. No 7. P. 703-709. (0,44 п.л./0,23 п.л.)

2. Исследование структуры и свойств бериллиевой бронзы после закалки в азоте высокого давления/ Вай Ян Мин Хтет [и др.]// Технология металлов. 2018. № 4. С. 25-30. (0,38 п.л./ 0,20 п.л.)

3. Перспективы закалки сталей и сплавов в газовой среде высокого давления / Вай Ян Мин Хтет [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 2. С. 37-42. (0,38 п.л./ 0,22 п.л.)

4. Сравнительная оценка методов определения коэффициентов теплоотдачи азота высокого давления / Вай Ян Мин Хтет [и др.]// Десятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России»: сборник докладов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. С. 117-121. (0,31 п.л./ 0,15 п.л.)

5. Исследование влияния газовой закалки на структуру и свойства прецизионного пружинного сплава / Вай Ян Мин Хтет [и др.]// Двенадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России»: сборник докладов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019 г. С. 207-211. (0,31 п.л./ 0,15 п.л.)

6. Моделирование упрочнения прецизионного пружинного сплава 36НХТЮ после закалки в азоте и старения / Вай Ян Мин Хтет [и др.]// Современные подходы и тенденции развития структурно-фазовых, химико-аналитических методов анализа: материалы XV Всероссийской конференции (г. Москва, 10 февраля 2023 г.) / НИЦ «Курчатовский институт» ВИАМ. М.: НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, 2023. С. 268-278. (0,69 п.л./ 0,30 п.л.)