

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Исследование неупругих свойств никелида титана с субмикро- и наномасштабными поверхностными слоями, сформированными электронно-ионно-плазменными методами</b>

УДК 661.88-02:539.211-022.532

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ72	Макаров Андрей Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Хасанов О.Л.	д.т.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
научный сотрудник	Нейман А.А.	к. т. н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Рагозин Дмитрий Валерьевич	к. и. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Исаева Елизавета Сергеевна			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материаловедение и технологии материалов	Хасанов О.Л.	д.т.н., профессор		

Томск – 2019 г.

*Планируемые результаты обучения по ООП 22.04.01*

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения</b> (выпускник должен быть готов)
P1	Осуществлять сбор, анализ и обобщение научно-технической информации в области материаловедения и технологии материалов с использованием современных информационно-коммуникационных технологий, глобальных информационных ресурсов
P2	Работать с патентным законодательством и авторским правом при подготовке документов к патентованию и оформлению ноу-хау
P3	Выполнять маркетинговые исследования и анализировать технологический процесс как объекта управления, разрабатывать технико-экономическое обоснование инновационных решений в профессиональной деятельности
P4	Руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
P5	Внедрять в производство технологии получения керамических, металлических материалов и изделий, в том числе наноматериалов, быть готовым к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов, позволяющих получать и диагностировать материалы и изделия различного назначения.
P6	Разрабатывать новые и модернизировать существующие технологии получения керамических, металлических материалов и изделий, в том числе наноматериалов
P7	Внедрять системы управления качеством продукции в области материаловедения, эксплуатировать оборудование, позволяющее диагностировать материалы и изделия из них, в том числе наноматериалы
P8	Действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения, выбирать наиболее рациональные способы защиты и порядка в действиях малого коллектива в чрезвычайных ситуациях
P9	Общаться в устной и письменной формах на государственном языке РФ и иностранном языке для решения задач профессиональной деятельности, подготавливать и представлять презентации планов и результатов собственной и командной деятельности, формировать и отстаивать собственные суждения и научные позиции
P10	Самостоятельно осваивать новые методы исследования, изменять научный, научно-педагогический и производственный профиль своей профессиональной деятельности
P11	Применять принципы рационального использования природных ресурсов, основные положения и методы социальные, гуманитарные и экономические подходы при решении профессиональных задач с учетом последствий для общества, экономики и экологии.
P12	Использовать основные категории и понятия общего и производственного менеджмента в профессиональной деятельности

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ О.Л.  
 Хасанов  
 (Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ72	Макарову Андрею Александровичу

Тема работы:

Исследование неупругих свойств никелида титана с субмикро- и наномасштабными поверхностными слоями, сформированными электронно-ионно-плазменными методами	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ №1646 от 01.03.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	04.06.2019
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p><i>Объект исследования – сплав Ti<sub>49,5</sub>Ni<sub>50,5</sub> (ат. %). Заготовки из сплава для изготовления рабочих образцов для исследований развития неупругих и пластических деформаций при кручении, расходные материалы и экспериментальное оборудование предоставляется лабораторией.</i></p> <p><i>Особые требования в плане безопасности проведения экспериментальной работы и влияния на окружающую среду отсутствуют.</i></p>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Подготовить обзор состояния исследований по теме работы;</li> <li>2. Исследовать морфологию образцов сплава <math>Ti_{49.5}Ni_{50.5}</math> с различными поверхностными модификациями и без них;</li> <li>3. Исследовать развитие обратимых неупругих деформаций (эффект сверхпластичности и памяти формы, суммарная неупругая деформация) и пластической деформации при кручении образцов <math>Ti_{49.5}Ni_{50.5}</math> с различными модификациями поверхности и без.</li> <li>4. Исследовать влияние модификации поверхности сплава <math>Ti_{49.5}Ni_{50.5}</math> на генерацию реактивных напряжений</li> <li>5. Подготовить ВКР по материалам экспериментальной работы, включая постановку задачи, методологический раздел и заключение</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p><i>Финансовый менеджмент</i></p>	<p>Д.В. Рагозин, старший преподаватель, отделение социально-гуманитарных наук</p>
<p><i>Социальная ответственность</i></p>	<p>Е.С. Исаева, старший преподаватель, отделение общетехнических дисциплин</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p><b>Реферат; литературный обзор</b></p>	
<p><b>Abstract; literature review</b></p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>11.03.2019</p>
--	-------------------

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>н.с. ЛМСсПФ ИФПМ СО РАН</p>	<p>Нейман А.А.</p>	<p>к.т.н.</p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>4БМ72</p>	<p>Макаров А.А.</p>		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа изложена на 133 с, содержит 27 рис., 19 табл., 64 источников, 1 прил.

Ключевые слова: никелид титана, мартенситные превращения, неупругая деформация, эффект памяти формы, сверхэластичность, реактивные напряжения.

Объектом исследования является сплав  $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$ .

Цель работы – исследовать влияние поверхностных слоев, сформированных электронно-ионно-плазменными методами, на неупругие свойства никелида титана.

В процессе исследования проводилась модификация поверхности образцов из никелида титана с помощью методов обработки низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками (НСЭП), ионной имплантации и магнетронного осаждения. Для оценки неупругих свойств никелида титана проводились испытания кручением на установке типа обратного крутильного маятника.

Для анализа морфологии поверхности образцов получены изображения с помощью оптической микроскопии. Представлены диаграммы накопления и возврата деформации, соответственно, с увеличением нагрузки и при разгрузке образцов сплава  $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$  с исходной и с модифицированной поверхностью. Построены кривые развиваемых реактивных напряжений при нагреве в образцах  $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$  с различными поверхностными модификациями и без, а также после испытаний на сверхэластичность.

Степень внедрения: лабораторное оборудование.

Область применения: медицинские технологии и авиакосмическая промышленность.

## ABSTRACT

Final qualifying work consists of 133 pages, 27 figures, 19 tables, 64 references, 1 attachment.

Key words: titanium nickelide, martensitic transformation, inelastic deformation, shape memory effect, superelasticity, reactive stresses.

The object of research is an  $\text{Ti}_{49.5}\text{Ni}_{50.5}$  alloy.

The aim of the work is to study the influence of surface layers, formed by electron-ion-plasma methods, on inelastic properties of titanium nickelide.

Study of the inelastic properties of titanium nickelide with submicro and nano surface layers formed by electron-ion-plasma methods.

In the course of research modification of the surface layers was performed by treatment of low-energy high-current electron beams (LEHCEB), ion implantation and magnetron deposition. Torsional tests were performed on the reverse torsion pendulum machine.

Optical microscopy images of samples for surface morphology analysis were obtained. Diagrams of deformation accumulation when loading and return when unloading in  $\text{Ti}_{49.5}\text{Ni}_{50.5}$  samples with the original and modified surfaces were shown. Reactive stress diagrams with rising temperature in  $\text{Ti}_{49.5}\text{Ni}_{50.5}$  samples without coatings, after superelasticity tests and with different modified surfaces were represented.

Degree of implementation: laboratory equipment.

Scope: medical technology and aerospace industry.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

МП: мартенситное превращение

B2: кубическая высокотемпературная  $\beta$ -фаза

B19': моноклинный мартенсит

R: ромбоэдрическая фаза

Mн: температура начала МП B2→B19' при охлаждении образцов

Mк: температура конца МП B2→B19' при охлаждении образцов

Aк: температура конца МП B19'→B2 при нагреве образцов

Aн: температура начала МП B19'→B2 при нагреве образцов

ЭПФ: эффект памяти формы

СЭ: эффект сверхэластичности

НД: неупругая деформация

НСЭП: низкоэнергетический сильнооточный электронный пучок

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	10
1. Литературный обзор	12
1.1 Мартенситные превращения	12
1.2 Эффекты неупругости в сплавах на основе никелида титана и их классификация	15
1.3 Модификация поверхности материала потоками заряженных частиц	20
1.3.1 Использование низкоэнергетических сильнофокусированных электронных пучков для модификации поверхности	21
1.3.2 Использование ионной имплантации для модификации поверхности	24
1.3.3 Использование магнетронного осаждения для модификации поверхности	27
2. Методическая часть	31
2.1 Материалы и методы обработки	31
2.2 Методы исследований	36
2.3 Методы оптической микроскопии	41
3. Результаты и их обсуждение	46
3.1 Морфология поверхности образцов $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$ с покрытиями, сформированными методами магнетронного осаждения, ионной имплантации и электронно-пучковой обработки на образцах $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$	46
3.2 Исследование морфологии поверхности $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$ исходных образцов и после НСЭП обработки до и после нагружения	51
3.3 Влияние имплантации ионов Si, Mo, Ta на механическое поведение образцов TiNi при деформировании кручением при различных температурах	53
3.4 Влияние покрытий Mo и Ta на механическое поведение $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$ при деформировании кручением при различных температурах	55
3.5 Влияние электронно-пучковой обработки $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$ на механическое поведение при деформировании кручением при различных температурах	57
3.6 Влияние модификации поверхности сплава $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$ на генерацию реактивных напряжений	59

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	64
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	64
4.1.1 Инициализация исследования и его технико-экономическое обоснование	64
4.1.2 Потенциальные потребители результатов исследования	65
4.1.3 SWOT – анализ	66
4.2 Организация работ	68
4.2.1 Организация и планирование работ	68
4.2.2 Продолжительность этапов работ	69
4.2.3 Расчет накопления готовности проекта	74
4.3 Расчет сметы затрат на выполнение проекта	75
4.3.1 Расчет затрат на материалы	75
4.3.2 Расчет величины амортизационных отчислений	76
4.3.3 Расчет основной заработной платы	77
4.3.4 Расчет бюджета затрат НИИ	80
4.4 Оценка экономической эффективности проекта	80
5. Социальная ответственность	86
5.1 Введение	86
5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	86
5.3 Производственная безопасность	89
5.4 Анализ вредных производственных факторов	90
5.5 Анализ опасных производственных факторов	94
5.6 Экологическая безопасность	98
5.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	99
6 Список опубликованных работ студента	103
7 Заключение	104
8. Список литературы	106
9 Приложение I	116

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время область применения сплавов на основе никелида титана простирается от медико-биологических конструкций до функциональных узлов космических аппаратов. Это обусловлено тем, что они обладают уникальными физико-механическими свойствами: способность обратимого восстановления предварительно заданной деформации при нагреве (эффекта памяти формы), сверхэластичность, высокие прочностные и пластические свойства; исключительные по величине эффекты термомеханической памяти, термомеханическая и термоциклическая долговечность.

Практическое использование никелида титана постоянно требует модификации поверхностных слоёв с целью улучшения их прочностных характеристик, коррозионной стойкости и биосовместимости. Методы модификации поверхностных слоёв, к которым относятся обработка низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками (НСЭП), ионная имплантация и магнетронное осаждение особенно важны для областей промышленности, где к состоянию поверхности предъявляют повышенные требования, в частности, в медицине. В данной работе рассмотрено влияние обработки поверхности никелида титана электронно-ионно-плазменными воздействиями на его свойства.

Таким образом, **цель работы** – исследовать влияние поверхностных слоев, сформированных электронно-ионно-плазменными методами, на неупругие свойства никелида титана.

Для выполнения данной цели требовалось решить следующие **задачи**:

1. Изучить литературу по вопросу: мартенситные превращения в сплавах на основе никелида титана, эффекты сверхэластичности и памяти формы и модификация поверхности ионно-электронно-плазменными воздействиями;

2. Освоить экспериментальные методики испытаний деформацией кручением образцов никелида титана для исследований эффектов неупругости.
3. Исследовать морфологию образцов сплава  $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$  с электронно-ионно-плазменными поверхностными модификациями и без них;
4. Исследовать развитие обратимых неупругих деформаций (эффект сверхластичности и памяти формы, суммарная неупругая деформация) и пластической деформации при кручении образцов  $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$  с различными модификациями поверхности и без.
5. Исследовать влияние модификации поверхности сплава  $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$  на генерацию реактивных напряжений

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Мартенситные превращения

Мартенситные превращения (МП) являются одним из основных типов структурных превращений в твердом состоянии и происходят во многих металлических сплавах, интерметаллических и металлокерамических соединениях [1]. При мартенситном превращении взаимное расположение атомов или молекул меняется вследствие их упорядоченных перемещений, причем их соседство (или ближайшее окружение) сохраняется. Также можно отметить ориентированный характер этих смещений при переходе кристаллической структуры аустенита в мартенсит. Следствиями этих особенностей становятся заметный макроскопический сдвиг и, зачастую, появление мартенситного рельефа в виде параллельных полос на предварительно полированной поверхности материала [2]. Г.В. Курдюмов в работе [3] обобщил многочисленные экспериментальные данные и выделил следующую важную черту мартенситных превращений: «Мартенситное превращение состоит в закономерной перестройке решетки, при которой атомы не обмениваются местами, а лишь смещаются друг относительно друга на расстояния, не превышающие межатомные». Это определение делает МП уникальными и принципиально отличает их от всех других фазовых превращений. Бездиффузионный сдвиговый механизм перестройки определяет уникальные закономерности МП, кристаллогеометрические соотношения и размерно-ориентационную связь между атомно-кристаллическими решетками аустенитной и мартенситной фаз, их структурно-морфологические признаки, такие как форма кристаллов мартенсита, их границы между собой и с аустенитной фазой (или габитусные плоскости), а также внутреннюю структуру фаз.

С физической точки зрения МП происходит из-за роста неустойчивости кристаллической решетки аустенита, обусловленной возможностью изменения симметрии и параметров исходной решетки, которые

обеспечивают снижение свободной энергии системы [1]. Термодинамический анализ МП основан на исследовании температурных зависимостей свободных энергий исходной аустенитной и конечной мартенситной фаз и их разности  $\Delta F$ . Точка их равенства  $T_0$  есть температура равновесия фаз, а  $\Delta F$  определяют движущие силы МП, прямого или обратного. Компенсация “нехимических” вкладов (упругого и поверхностного) энергий требует переохлаждения или перегрева, которые определяют температурный гистерезис МП или, говоря иначе, межкритический интервал.

По кинетике возникновения мартенситной фазы (зависимости от температуры и времени) все МП принято разделять на два вида: атермические и изотермические [3]. Существует также ряд сплавов, в которых присутствуют обе кинетики мартенситных превращений. В случае атермического МП четко определяются критические температуры начала и конца прямых ( $M_s$ ,  $M_f$ ) и обратных ( $A_s$ ,  $A_f$ ) превращений и температурный гистерезис  $\Delta T$ . Величина гистерезиса  $\Delta T$  при атермическом МП может колебаться в достаточно широких пределах. Так, в случае сталей и железоуглеродистых сплавов гистерезис  $\Delta T$  может достигать нескольких сотен градусов, а в сплавах цветных и благородных металлов - десятков и единиц градусов (термоупругое превращение) [3].

Сплавы с изотермической кинетикой МП можно переохлаждать в аустенитном состоянии до температур ниже температуры начала прямого МП ( $M_s$ ). Если же после этого выдерживать сплав при определенной температуре, происходит МП. Данный тип кинетики был замечен в сталях и других сплавах на основе железа, а потом и в ряде сплавов цветных металлов.

В случае термоупругого МП увеличение количества мартенситной фазы при понижении температуры происходит за счёт образования новых кристаллов мартенсита путём подрастания ранее возникших. Отличительной чертой термоупругого МП является высокая подвижность границ

мартенситных кристаллов, что является результатом их когерентности с исходной фазой и сохранения возникающей упругой энергии в процессе превращения. Для термоупругого равновесия (между исходной и мартенситной фазой) должно выполняться условие равенства между химической движущей силой и возникающей при МП упругой энергией. Этот баланс выполняется для каждого образующегося мартенситного кристалла [3]. Химическая движущая сила практически постоянна по всему химически однородному материалу, в то время как энергия упругой деформации существенно неоднородна в частично превращающемся образце. Поэтому при описании МП необходимо рассматривать термоупругое равновесие (с исходной фазой) для каждого отдельного кристалла мартенсита. В процессе движения межфазной границы также возникают силы трения, которые приводят к отклонению от действительного термоупругого равновесия и некоторому дополнительному гистерезису превращения. Если в результате релаксации поля упругой деформации вокруг мартенситной пластины происходит пластическая аккомодация, например, за счёт образования дислокаций (и/или их скольжения), то это нарушает баланс химической и упругой энергии и в результате возникает необратимая добавочная компонента в общем изменении энергии. Такая ситуация обуславливает дополнительную потерю подвижности межфазной границы, что препятствует её обратному движению при повышении температуры. Поэтому обратное МП может происходить (и часто происходит) путём «зарождения» и последующего роста исходной фазы в мартенситной [3].

## 1.2 Эффекты неупругости в сплавах на основе никелида титана и их классификация

Мартенситная неупругость наряду с упругостью и пластичностью – это основной и особый вид поведения ряда кристаллических материалов при деформации, причиной которого являются фазовые структурные переходы. К категории эффектов механического поведения в системе Ti-Ni относятся эффекты мартенситной неупругости: эффект памяти формы, сверхэластичность (псевдоупругость, ферроупругость). Важнейшими характеристиками материала с вышеперечисленными эффектами являются температуры прямых и обратных фазовых переходов –  $M_n$ ,  $M_k$ ,  $A_n$ ,  $A_k$ , которые указывают на начало перехода в мартенситную фазу, конец перехода в мартенситную фазу, начало перехода в аустенитную фазу, конец перехода в аустенитную фазу, соответственно [4].

Эффект памяти формы (ЭПФ). Если металл приобретает неупругую деформацию за счёт изотермического нагружения мартенсита или пластичности превращения, то он возвращает её при нагреве в интервале температур от  $A_n$  до  $A_k$ . При повторении цикла «нагрев-охлаждение» (рис.1) материала под нагрузкой при температурах от  $M_k$  до  $A_k$  происходит накопление и возврат деформации в процессе охлаждения и нагрева соответственно, до полного разрушения материала. Такое явление называют эффектом многократно обратимой (двусторонней) памяти формы [4]. Однократный эффект памяти формы, по сути, является частным случаем эффекта двусторонней памяти формы. Также этот эффект может проявляться не только при наличии нагрузки, но и при ее отсутствии [5].

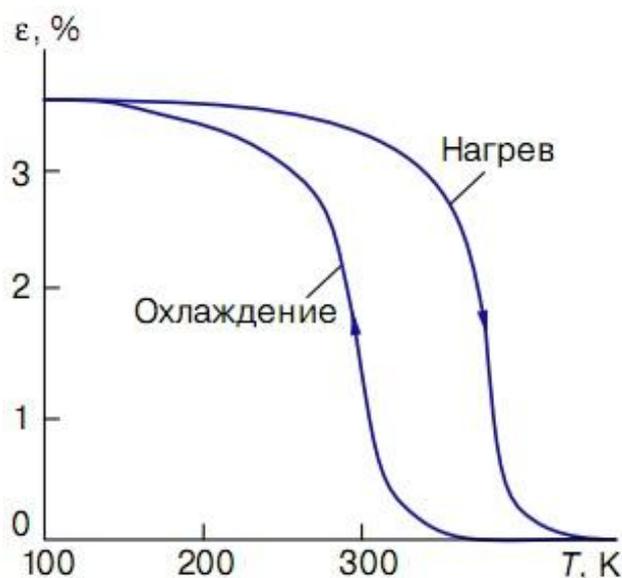


Рис.1. Диаграмма, иллюстрирующая эффект памяти формы [2]

Механизм ЭПФ состоит в следующем. При охлаждении ниже  $M_n$  без нагрузки образуются кристаллы мартенситной фазы. В процесс перехода аустенит→мартенсит происходит сдвиг атомов из первичного положения аустенитной решётки в новую и, также, меняется форма исходной элементарной ячейки высокотемпературной фазы. Как правило, сдвиг в различных зернах аустенитной фазы происходит в беспорядочных направлениях. Это выгодно энергетически, так как в этом случае внутренние напряжения, возникшие в результате деформации, минимальны. Но при этом, и общая деформация формы образца во всех направлениях практически равна нулю. Таким образом, даже если присутствует значительная деформация в микрообъёмах, макроскопического изменения формы образца не происходит из-за «хаотичности» направлений локальных сдвигов.

Особенность термоупругого МП состоит в том, что во время обратного превращения атомы смещаются обратимо в положения исходной решётки, возвращая форму и ориентацию первоначальных зёрен. Рост кристаллов новой фазы при охлаждении под нагрузкой происходит из-за совпадения векторов сдвига мартенситной фазы и направлением действия внешних приложенных напряжений. Макроскопическая неупругая деформация

накапливается в результате ориентированного роста объема мартенситного домена.

В материалах с термоупругими мартенситными превращениями реализуется механизм деформации, при котором друг относительно друга атомы смещаются незначительно, поэтому при снятии нагрузки они возвращаются обратно. В случае обычной пластической деформации атомы смещаются относительно своего ближнего окружения на расстояния, превышающие межатомные, и в результате не возвращаются в своё исходное положение. [5].

Эффект сверхэластичности (СЭ) – способность материала при снятии нагрузки восстанавливать накопленную в процессе нагружения деформацию (в изотермических условиях).

Предположим, что кристаллу в аустенитном состоянии при температуре деформирования  $T_d$  начали прикладывать внешнюю нагрузку. Тогда температура  $M_n$  по термодинамическому уравнению Клаузиуса – Клапейрона:

$$\frac{d\sigma_M}{dT} = \frac{\rho q}{T_0 \varepsilon_M}$$

(где  $\rho$  – плотность материала,  $q$  – удельная энтальпия превращения,  $\varepsilon_M$  – неупругая деформация при мартенситном превращении,  $T_0 \approx (M_n + A_k)/2$  – температура равновесия высоко- и низкотемпературной фаз в отсутствии напряжения [2]) будет повышаться, также как и в случае кипения жидкости под давлением. Когда напряжение достигнет определенного значения, температура достигнет или превысит значения  $T_d$ . В этот момент начинается превращение аустенит  $\rightarrow$  мартенсит. Если теперь снять нагрузку, то температуры МП ( $M_n, M_k, A_n, A_k$ ) вернуться к исходному значению (рис.2) [4]. В случае, когда  $T_d > A_k$  возникший мартенсит становится абсолютно термодинамически неустойчивым. Следовательно, он неизбежно превратится в аустенит при удалении нагрузки, а накопленная деформация вернётся [2].

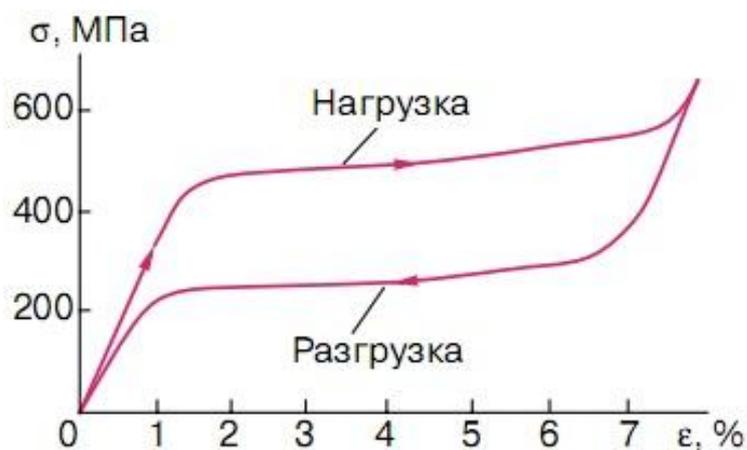


Рис. 2. Диаграмма, иллюстрирующая эффект сверхэластичности [2]

Если  $A_n < T_d < A_k$ , то материал демонстрирует оба эффекта: частично памяти формы, а частично сверхэластичности. Физика этих процессов полностью эквивалентна и эффект памяти формы выступает как нереализованная (заторможенная) сверхупругость. В случае, когда  $T_d < A_n$ , сформировавшийся мартенсит стабилен и при разгрузке сверхупругость не проявляется. Тогда восстановить накопленную деформацию можно будет двумя способами: нагреть металл, тогда деформация будет возвращаться за счет реализации ЭПФ, или же приложив нагрузку в противоположную сторону. Поскольку процесс знакопеременного нагружения можно повторять многократно. Поскольку получающиеся здесь семейства кривых напряжение – деформация напоминают петли магнитного гистерезиса, то это механическое проявление мартенситной неупругости нередко называют ферроупругостью [2].

Эффект генерации реактивных напряжений. Допустим, что образец (в мартенситном состоянии), жестко зафиксирован в установке и затем нагрет выше температуры  $A_k$ . В диапазоне температур обратного МП образец мог бы восстановить накопленную деформацию, потому что при нагреве происходит обязательный возврат деформации из-за геометрической обратимости МП. Но так как образец находится в стесненных условиях, то материал начинает генерировать механические напряжения. Развиваемые образцом механические напряжения в стеснённых условиях деформации

называют реактивными ( $\sigma_r$ ) [8]. Начало их генерации приходится на температуру  $A_n$ , а интенсивный рост  $\sigma_r$  – на интервал  $A_n - A_k$ . «Дорастание» величины  $\sigma_r$  до насыщения продолжается при температурах выше  $A_k$ . В зависимости от состава сплава при температурах 600-700К наблюдается уменьшение величины  $\sigma_r$ , связанное с релаксацией генерируемых материалом напряжений. В сплавах на основе никелида титана  $\sigma_r$  могут достигать 0.7–0.8 ГПа [7]. Мартенситные превращения (часто вместе с диффузионным перераспределением компонентов и изменением атомного порядка) составляют основу многочисленных структурных и фазовых превращений, которые лежат в основе различных методов механической и термической обработки и позволяют целенаправленно изменять свойства кристаллических материалов [2,5].

### 1.3 Модификация поверхности материала потоками заряженных частиц

Конструкционные материалы, используемые в медицине, должны быть полностью биологически совместимыми с организмом человека. В противном случае их медицинское применение может приводить к возникновению осложнений и отторжению имплантата. Кроме того, металлические изделия подвергаются коррозии в среде организма и вследствие этого их основные эксплуатационные свойства могут ухудшаться: снижается прочность и пластичность, ухудшается состояние поверхности изделия, происходит растворение компонентов сплавов в виде металлических ионов в жидкостях и тканях организма.

Хотя никель является необходимым микроэлементом, участвующем во множестве процессов в организме человека (регуляции обмена ДНК, в обмене жиров, обеспечении клеток кислородом), при его повышенной концентрации происходит внедрение атомов Ni в клетки, где он вызывает нарушения обменных и ферментных процессов и служит причиной возникновения канцерогенных продуктов [6]. После операций по его имплантации во внутренние органы часто наблюдается патологическая реакция гиперчувствительности организма. Причем преимущественно никель накапливается в тканях сердца, легких и почках [9]. Его действие может проявляться в виде аллергических реакций, анемии, повышенной возбудимости центральной и вегетативной нервной системы. Хроническая интоксикация никелем повышает риск развития злокачественных новообразований (легких, почек, кожи) – по причине влияния на ДНК и РНК [6].

Очевидно, что наличие барьерных слоев из толерантных к живой ткани химических элементов на поверхности имплантатов из TiNi, ограничивая проникновение никеля в биосреду, позволило бы значительно снизить риск токсических реакций организма из-за его наличия в имплантируемом изделии.

При механическом нагружении образца деформации сначала подвергаются его поверхностные слои [10]. Также на процессы пластического течения сильно влияет состояние поверхности и приповерхностные слои [11].

На сегодняшний день существует множество методов модификации поверхности материала потоками заряженных частиц. Наиболее распространенные методики: ионно– или электронно–лучевое воздействия, лазерное облучение. Выбор конкретной методики зависит от поставленных задач, но в целом ее применение позволяет получить в поверхностных модифицированных слоях повышение функциональных свойств без изменения свойств в объеме материала.

### **1.3.1 Использование низкоэнергетических сильноточных электронных пучков для модификации поверхности**

Использование электронных пучков с высокими плотностями энергии лежит в основе новых способов модификации металлических материалов, которые позволяют создавать на поверхности материала слои с принципиально новыми структурами и свойствами.

В результате электронно-пучкового воздействия в поверхностных слоях материала формируется зона с отличающимся (от свойств во всем объеме материала) физико-механическими и химическими свойствами. Вследствие этого значительно увеличиваются такие свойства материала, как: коррозионная стойкость, сопротивление материала циклическим нагрузкам, износостойкость [12].

Электроны при облучении передают атомам материала энергию благодаря упругим и неупругим соударениям электронов с атомами кристаллической решётки материала. При неупругом взаимодействии электрона с ядром его кинетическая энергия расходуется на возбуждение ядра и тормозное рентгеновское излучение. Из уравнений Максвелла

следует, что электрически заряженная частица, движущаяся с ускорением, излучает электромагнитные волны. Такое излучение называется тормозным. А торможение электронов в поле атомных электронов еще слабее. Таким образом, тормозное излучение при взаимодействии электронного пучка с мишенью играет несущественную роль.

При взаимодействии пучка с веществом основная часть энергии переходит в тепловую. При достаточной плотности мощности электронного пучка температура твердого тела будет постоянно повышаться и в определенный момент достигнет температуры плавления. При окончании действия электронного пучка расплавленный материал охлаждается и затвердевает. Поскольку процессы, как расплавления, так и охлаждения расплавленного материала сверхбыстрые (длительности воздействия электронного пучка могут быть порядка нескольких микросекунд), то возможно образование как кристаллической, так и аморфной структур в приповерхностном слое [12].

Кроме того, воздействие импульсных электронных пучков приводит к появлению напряжений [13] в поверхностных слоях материала, что в случае сплавов с термоупругими мартенситными превращениями (в частности в сплавах на основе никелида титана) могут приводить к изменению значений температур МП.

Имеется большое количество работ, посвящённых влиянию обработки электронными пучками на свойства неупругости никелида титана. В частности, в работе [14] исследовано влияние импульсной электронной обработки TiNi. Применение данной методики позволяет создать на поверхности слой, который препятствует выходу агрессивных ионов из материала.

В [15] показано, что воздействие электронного пучка на поверхность никелида титана приводит к увеличению твердости в приповерхностном слое, глубиной ~400 нм, в десятки раз.

В работе [16] в атмосфере Ar проводили облучение TiNi с помощью НСЭП. Авторы обнаружили, что в результате такой обработки существенно уменьшается концентрация атомов примеси углерода и кислорода, которые естественным путем адсорбируются в приповерхностных слоях образцов. После электронно-пучковой обработки никелида титана в атмосфере азота на его поверхности создается слой TiN, препятствующий выходу ионов никеля из сплава. При этом обработка не ухудшает степень восстановления формы никелида титана, однако температуры МП изменяются [16].

В научной литературе, и в частности в работах [17,18], посвященных модификации поверхностного слоя никелида титана электронными пучками, освещается структурное состояние сплава TiNi, испытавшего циклическое расплавление и перекристаллизацию. Данные работы посвящены исследованию микроструктуры в сплаве TiNi, сформированной в результате плавления тонкого поверхностного слоя при импульсном воздействии НСЭП. В работах имеются карты EBSD, показывающие формирование наноструктуры в поверхностном слое.

Воздействие пучками электронов низких энергий обладает рядом достоинств: очищение поверхности от легких элементов, распределение поглощаемой энергии по глубине мишени практически не зависит от оптических свойств поверхности материала, достижима значительная площадь сечения пучка (КПД таких источников в разы выше, чем у других методик, основанных на потоке заряженных частиц). Высокие значения плотности энергии, малая продолжительность обработки, практически полное поглощение заряженных частиц мишенью делают воздействие электронными пучками уникальным и высокоэффективным инструментом для целенаправленной модификации структуры и свойств металлических материалов.

### **1.3.2 Использование ионной имплантации для модификации поверхности**

Ионная имплантация – процесс обработки поверхности материала путем облучения его поверхности пучком ионов, в результате чего происходит внедрения ионов мишени в поверхностные слои материала. Ионную имплантацию в металлы применяют для повышения их прочности, твёрдости, износостойкости, усталостных характеристик, коррозионной стойкости и т.д. [25-28]. Этот процесс позволяет ввести практически любую примесь, любой элемент Периодической системы в приповерхностный слой вещества и изменить состав этого слоя на глубине до 0.1–0.2 мкм.

Достоинством данного метода является то, что в поверхностных слоях создается градиентное распределение концентрации внедряемого элемента, при этом модифицированный слой не имеет четко выраженной границы раздела с немодифицированными слоями материала, а значит, физико–механические свойства этих слоев имеют плавное изменение по глубине.

При ионной бомбардировке подложки ионы проникают вглубь материала. Внедрение ионов в поверхность материала становится существенным, когда энергия ионов достигает значения  $E > 1$  кэВ [19]. Ионы в результате многочисленных столкновений постепенно теряют энергию, рассеиваются, отражаются в обратную сторону или останавливаются, распределяясь по глубине. Энергетические потери обусловлены как взаимодействием с электронами мишени (неупругие столкновения), так и парными ядерными (упругими) столкновениями, при которых энергия передаётся атомам мишени в целом и резко изменяется направление движения частицы [20].

При внедрении ионов в кристаллическую решетку обрабатываемого материала происходит появление дефектов структуры. Выбитые из узлов решетки атомы вещества приводят к образованию вакансий и дефектов структуры в виде внедренных межузельных атомов. Эти же дефекты

возникают при внедрении ионов между узлами решетки. Скопление таких дефектов образует дислокации и дислокационные скопления.

Под радиационным повреждением понимают вакансии, поры, дефекты типа дислокаций, образование аморфной и прочих вторых фаз, разупорядоченные сверхструктуры. В случае, когда радиационные повреждения снижают эксплуатационные свойства деталей, производят отжиг; температурная активация ускоряет перестройку атомов, что приводит к более высокой термодинамической стабильности упорядоченной кристаллической решетки [21].

Траектория иона представляет собой сложную ломаную линию, состоящую из отрезков пути между элементарными актами рассеяния на большие углы. Функция распределения стабилизированных ионов по глубине образца имеет максимум (расстояние точки максимума от поверхности определяется величиной среднего пробега ионов данной энергии (рис. 3)).

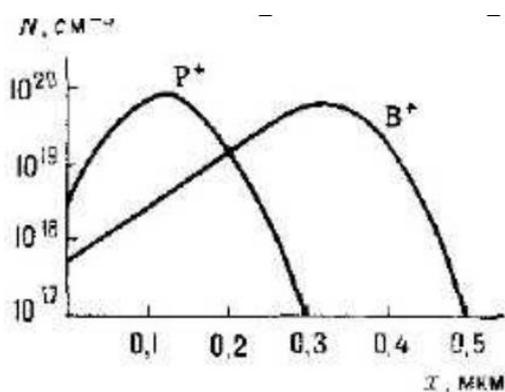


Рис.3 Распределения по глубине  $x$  ионов В и Р, внедрённых и Si:  $\epsilon = 100$  кэВ, доза ионов  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Для ионов В  $R_{cp} = 300$  нм,  $\Delta R = 73$  нм, для Р  $R_{cp} = 124$  нм,  $\Delta = 46$  нм, ( $N$  — число ионов 1 см<sup>3</sup>) [18]

Важными характеристиками процесса ионной имплантации являются проективный пробег иона  $R_{пр}$  — проекция траекторного пробега на направление первоначального движения частицы, а также распределение имплантированных атомов по  $R_{пр}$ , т. е. по глубине (при бомбардировке по нормали к поверхности мишени) [19]. Распределение по глубине частиц,

имплантированных в аморфную мишень, характеризуется средним пробегом  $R_{\text{ср}}$ , среднеквадратичным разбросом пробегов  $\Delta R$  и параметром  $S_k$ , определяющим асимметрию распределения Пирсона (Рис.3). При  $S_k = 0$  распределение Пирсона переходит в гауссовское. При ионной имплантации в монокристаллы распределение внедрённых частиц по глубине может видоизменяться из-за каналирования заряженных частиц. Изменяя в процессе ионной имплантации энергию ионов, можно получить распределение внедрённой примеси по глубине желаемой формы [20-21].

Из литературных источников следует, что высокодозовая имплантация сплава на основе TiNi неметаллическими ионами кислорода [22] и фосфора [23] приводит к повышению таких характеристик как твердость, биосовместимость, коррозионная стойкость. Также в работе [23] показано, что в сплаве  $Ti_{49.7}Ni_{50.3}$  после ионной имплантации фосфором изменились не только температуры прямого и обратного мартенситных превращений, но также их последовательность: мартенситное превращение  $B2 \rightarrow B19'$  протекает без образования R-фазы, тогда как до ионной имплантации обратное мартенситное превращение в данном сплаве осуществлялось по схеме  $B19' \rightarrow R \rightarrow B2$ .

В работе [24] было проведено исследование влияния высокодозовой имплантации ионами  $Ca^{+}$  с дозами ионного облучения  $1 \times 10^{17}$  и  $5 \times 10^{17}$  ион·см<sup>-2</sup> на сплав  $Ti_{49.8}Ni_{50.2}$ . В результате ионной имплантации образуется приповерхностный слой с высокой концентрацией кальция, а также оксидов кальция и титана. При этом независимо от дозы облучения, обработка ионами кальция существенно не влияет на параметры эффекта памяти формы в сплаве  $Ti_{49.8}Ni_{50.2}$ , а также почти не приводит к изменениям характеристических температур МП, что может быть связано с небольшой дозой облучения.

В работе [25] была проведена высокодозовая имплантация ионами  $Mo^{+}$  сплава  $Ni_{50}Ti_{40}Zr_{10}$ . В результате величина максимальной обратимой деформации в имплантированных образцах оказалась в среднем на 10%

выше, чем в образцах без обработки. Вследствие создания в этих слоях модифицированной деформационной структуры, предотвращающей зарождение трещин, пластичность всего объема материала до разрушения повышается.

Проводились исследования влияния высокодозовой ионной имплантации на приповерхностные слои [26, 27] и на физико–механические и неупругие свойства [15, 27-29] сплава  $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$  в целом. Поверхностные слои были модифицированы ионами Ti, Cu, Zr (дозы облучения находились в диапазоне от  $0.7 \times 10^{17}$  до  $5.6 \times 10^{17}$  ион·см<sup>-2</sup>). По результатам этих исследований видно, что поведение как деформационных параметров ЭПФ (накопленные и возвращенные неупругие деформации), так и температурных параметров ЭПФ (температуры концов интервалов накопления и возврата деформации) не зависит от химического элемента модифицирующего иона и слабо зависит от дозы облучения.

Одним из важных положительных следствий ионно-пучковой обработки никелида титана является то, что в его поверхностных слоях формируются следующие друг за другом безникелевый и обедненный никелем слои [30]. В результате на порядок уменьшается количество никеля, выходящего на поверхность и переходящего в химический раствор – имитатор биологической среды.

### **1.3.3 Использование магнетронного осаждения для модификации поверхности**

Магнетронное осаждение – один из перспективных методов нанесения тонкопленочных покрытий различного сложного химического состава (оксидов, нитридов, карбидов, карбонитридов и т.д.). Этот способ обеспечивает относительно высокие скорости нанесения, высокую степень адгезии покрытия и подложки, возможность получения равномерных по толщине покрытий на большой площади подложки, возможность получения пленок химических соединений заданного состава.

Недостатком этого метода является невозпроизводимость состава покрытий при их формировании в «переходных» режимах горения магнетронного разряда. В то же время «переходные» режимы представляют большой интерес для получения покрытий с широким диапазоном соотношения концентрации металлической и газовой компонент, а также получение приемлемой скорости их роста. Стабилизация процесса распыления в «переходных» режимах осуществима путем стабилизации состояния системы катод-плазма-подложка с помощью управления расходом реактивного газа [31].

В процессе магнетронного осаждения пленки формируются из потоков частиц, образованных либо в низкотемпературной плазме разряда, либо в результате физического распыления материала мишени. Именно поэтому свойства и структура покрытий напрямую зависят от состояния и параметров плазмы магнетронного разряда, а именно: плотность; химический и компонентный состав; кинетическая и потенциальная энергия частиц [32].

Рассмотрим процесс нанесения пленки методом магнетронного осаждения с физической точки зрения. Тлеющий разряд на постоянном токе зажигается между катодом и анодом в среде инертного газа (как правило, аргона) при пониженном давлении 0,1 – 1 Па. Это приводит к поддержанию нужного количества заряженных частиц (электронов и ионов) в разряде путем ударной ионизации нейтральных атомов в электрон-атомных столкновениях. Если магнитного поля нет, ионы аргона ускоренно движутся к катоду, приобретая энергию, близкую к разности потенциалов катод – анод. При разности потенциалов в сотни вольт – единицы кВ происходит интенсивное физическое распыление катода. Распыленные нейтральные частицы материала катода, покидая катод с энергией единицы – десятки эВ, осаждаются на подложку или стенки вакуумной камеры, образуя там пленочное покрытие. Относительно большая энергия распыленных частиц по сравнению с энергией частиц при термическом испарении вносит свои особенности в процесс формирования покрытиях [33].

В литературных источниках встречаются также исследования физико-механических свойств сплавов на основе TiNi с модифицированными поверхностными слоями химико-термическими методами. Так, в работе [34] показано, что насыщение поверхностных слоев сплавов на основе TiNi азотом приводит к значительному улучшению их коррозионной стойкости.

В работе [35] показано, что при оксидировании образца TiNi приводит к созданию на его поверхности оксидной плёнки, которая также приводит к повышению коррозионной стойкости сплавов на основе TiNi. Однако, при этом ухудшается эффект сверхэластичности в этих сплавах вследствие формирования обогащенного Ti поверхностного слоя, в котором мартенсит не образуется под действием деформации.

Работа [36] посвящена формированию покрытий из золота (толщины 0.5 и 4 мкм) электрохимическим методом на поверхности медицинского сплава TiNi. Авторы отмечают, что чем больше толщина покрытия из Au, тем сильнее снижается величина восстановимой деформации никелида титана.

В работе [37] исследовалось влияние условий процесса магнетронного осаждения покрытия тантала на фазообразование в сплаве TiNi. Обнаружено, что в зависимости от температуры подложки, давления в камере при осаждении покрытий, наличия примесей в остаточной атмосфере камеры формируется низкотемпературная  $\beta$ -Ta фаза с тетрагональной структурой или высокотемпературная  $\alpha$ -Ta фаза с ОЦК структурой.

Метод магнетронного осаждения использовали в [38] для осаждения тантала на поверхность сплава никелида титана. Показано, что в результате формируются наноструктурные двухфазные ( $\alpha$ -Ta +  $\beta$ -Ta) покрытия, которые не вносят значительных изменений в структурно-фазовые состояния в областях материала-подложки, примыкающих к покрытиям. Параметр решетки фазы B2 в образцах с покрытиями практически равен значению в образцах без покрытий.

В работе [39] с помощью метода магнетронного осаждения авторы наносили покрытия из титана толщиной  $\sim 1.1$  мкм на поверхности сплава

Ti<sub>49.4</sub>Ni<sub>50.6</sub>. Обнаружено, что уже при 1% деформации образца покрытие растрескивается и отслаивается. Причиной этого может быть не только охрупчивание материала покрытия, но также и ухудшение адгезии системы «пленки-подложка» при образовании мартенситного рельефа. Таким образом, модифицированный слой должен удовлетворять еще одному условию – его неупругие свойства должны быть сопоставимы с неупругими свойствами TiNi.

## 2 МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Материалы и методы обработки

Исследуемый материал – сплав состава (ат.%)  $Ti_{49,5}Ni_{50,5}$  (далее TiNi) выплавлен методом электродугового шестикратного переплава из исходных компонентов: Ti–йодидный, Ni – марки Н0. Гомогенизирующий отжиг получившегося слитка проведен в вакуумной печи при температуре 1073 К в течение 3 часов, охлаждение с печью. С помощью рентгеноструктурного анализа выяснено, что данный сплав содержит около 90 об. % В2 фазы и 10 об. % вторичной фазы  $Ti_2Ni$  [25]. Сплав испытывает прямое фазовое превращение при охлаждении  $B2 \rightarrow B19'$  и обратное  $B19' \rightarrow B2$  при нагревании. Температуры начала и конца прямого и обратного МП  $M_H=283$  К,  $M_K=261$  К,  $A_H=299$  К,  $A_K=322$  К. Средний размер зерна в исходном слитке составлял  $20 \div 30$  мкм.

Образцы для испытаний имели форму параллелепипеда с размерами  $1 \times 1 \times 20$  мм и вырезались из слитка методом электроэрозионной резки на установке «АРТА 151» (ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН). После вырезки для снятия окалины образцы травили в растворе кислот (3ч.  $HNO_3 + 1$ ч. HF) в течение 3 мин. Вырезанные образцы отжигали для снятия внутренних напряжений в течение 1 часа при  $T=1073$  К в вакууме ( $10^{-3}$  Па) с последующим охлаждением с печью. Затем все поверхности образца механически шлифовали на наждачной бумаге с постепенным уменьшением ее зернистости «до зеркального блеска». После шлифовки образцы электролитически полировали в растворе (3ч.  $CH_3COOH + 1$ ч.  $HClO_4$ ) в течение 10-15 с при  $T=273$  К и напряжении  $U=30$  В для снятия наклепанного слоя на поверхностях. Все образцы для испытаний прошли такую обработку и в дальнейшем обозначаются как исходные («Исх.»). После этой подготовки уже проводилась дальнейшая модификация поверхности.

Варьирование мощности пучка позволяет производить обработку поверхности изделия в режиме нагрева поверхности и в режиме плавления поверхностного слоя. Это позволяет проводить предварительную очистку поверхности от примесных карбо-, оксо-, нитридных соединений.

Модификация поверхности электронным пучком. Подготовленные образцы были подвергнуты обработке низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком на автоматической установке «SOLO» (ИСЭ СО РАН, Томск) (рис. 4). В рабочей камере с помощью форвакуумного и турбомолекулярного насосов создавали вакуум  $P_{\text{откачки}} = 3,5 \cdot 10^{-3}$  Па, после чего в камеру напустили рабочий газ аргон, при этом в камере сформировалось давление  $P_{\text{Ar}} = 3,5 \cdot 10^{-2}$  Па. Затем проводили облучение электронным пучком с частотой следования импульсов  $\nu = 0.3$  Гц, количество импульсов  $N = 10$ . Параметры электронного пучка: ток разряда  $I = 70$  А, напряжение  $U = 15$  кВ, плотность энергии  $E = 10$  Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса составляла  $t = 50$  мкс. Образцы с такой обработкой поверхности далее в работе обозначаются как «Исх.+НСЭП».



Рис.4 Установка для обработки ИСЭП «SOLO»

Ионная имплантация. Ионно–лучевая обработка проводилась на установке вакуумно-дугового частотно-импульсного ионного источника «Диана–2» (ИФПМ СО РАН) (рис.5). Ионы Si, Mo, Ta дозой  $0,5 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup> имплантировали при ускоряющем напряжении 60 кВ с частотой импульсов 50 Гц при плотности тока 0.43 мА/см<sup>2</sup> и температуре поверхности 420 К. Для проведения ионной имплантации использовали мишени из графита, технически чистого монокристалла кремния, а также мишени из молибдена (марки МЧВП с чистотой 99.95%) и тантала (марки ТВЧ с чистотой 99.94%). Образцы с такой обработкой поверхности далее в работе обозначаются как «Исх.+Mo», «Исх.+Ta», «Исх.+Si».



Рис. 5 Установка для ионно-лучевой обработки «Диана-2»

Магнетронное осаждение. Выбор молибдена и тантала в качестве осажденных материалов был обусловлен несколькими причинами: во-первых, при легировании сплава на основе TiNi атомы молибдена замещают атомы никеля на его подрешетке, а атомы тантала, наоборот, атомы титана на его подрешетке [7]. С прикладной точки зрения – эти элементы обладают хорошей совместимостью с биологической средой организма, кроме того эти элементы более рентгеноконтрастны (40) по сравнению с TiNi, что существенно облегчает их обнаружение и наблюдение в организме.

Покрyтия наносили на установке магнетронного осаждения «Leibold z80» (рис.6). В рабочей камере создавали вакуум  $P = 10^{-4}$  Па, после чего подложку с закрепленными на ней образцами нагревали до  $T = 473$  К. Камеру заполняли Ag под давлением  $P_{Ag} = 0.3$  Па. Затем проводилось осаждение молибдена и/или тантала на поверхность образца при следующих условиях:

ток катода (молибден, тантал)  $I = 25 \text{ A}$ , напряжение  $U = 270 \text{ В}$ , напряжение на образце  $U = 0 \text{ В}$ . Скорость роста толщины осажденного слоя  $v = 10 \text{ мкм/час}$ , на образцы в виде игл покрытия наносили с четырех сторон. Мишень из молибдена марки МЧВП имеет чистоту 99.95%, а мишень из тантала марки ТВЧ 99.94%. Заданная толщина покрытий составила 200 нм. Образцы с такой обработкой поверхности далее в работе обозначаются как «Мо200», «Мо400», «Та200», «Та400».



Рис. 6 Установка магнетронного осаждения «Leibold z80»

## 2.2 Методы исследований

### Методика определения эффектов сверхэластичности и памяти формы и в образцах никелида титана

Влияние модификации поверхности на физико-механические свойства никелида титана исследовали методом кручения образцов в виде игл квадратного сечения на установке типа обратного крутильного маятника УПК-2М (рис.7).

Деформирование кручением выбрано по причине того, что в этом случае в процесс деформирования вовлекаются в первую очередь поверхностные слои и возможно оценить их влияние на свойства материала.

Установка была модернизирована для оценки отдельных вкладов в деформацию за счет различных механизмов ее накопления. Был добавлен механический модуль, производящий нагружение/разгрузку образца, что позволило повысить точность измерений, обеспечить прецизионность при нагружении, особенно в интервале малых нагрузок, а также избежать влияния человеческого фактора в эксперименте.

Механизм работы установки (рис. 7): образец (1), удерживаемый зажимами (2), нижний из которых неподвижен, верхний через ось (3) свободно подвешен на нити через блок к отвесу (4) для удержания оси зажима в вертикальном положении. Постоянный закручивающий момент обеспечивается электрическим двигателем (10) с червячной передачей для вращения плеча (6), с возможностью реверсивного хода (11) через осевое плечо (5). Снятие величин развиваемых образцом внутренних усилий производится при помощи электрических тензодатчиков (9), наклеенных на упругие элементы (8). Изменение температуры образца осуществляется с помощью печи сопротивления (или паров жидкого азота) (12). Точность измерения величины деформации на данной установке составляет  $\pm 0.06\%$  и определяется ценой деления на шкале угла закручивания. [7]

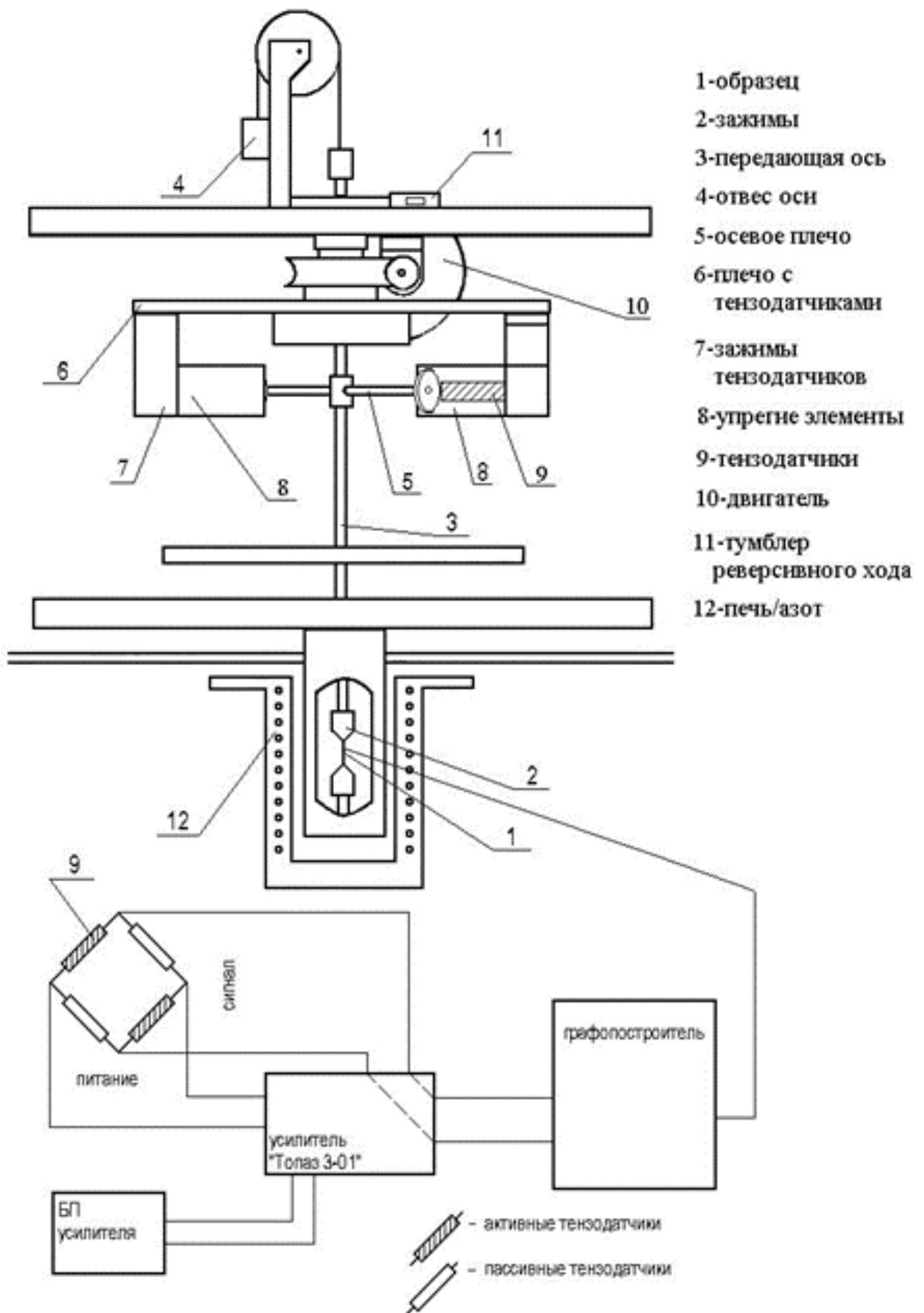


Рис. 7 Схема установки УПК–2М для измерения деформационных и силовых параметров неупругости в сплавах с ЭПФ

Схема 1: Образец закрепляли в установке, нагревали или охлаждали до определенной температуры (12), которая поддерживалась неизменной в течение всего цикла испытания ( $T_{исп} = const$ ). Прикладывая (используя электрический привод (10)) постоянно действующий закручивающий момент, образец (1) деформировали до величины деформации  $\gamma_{общ} = 6\%$  (общая деформация, накопленная за один цикл нагружения (участок ABC на рис. 8)). Затем образец равномерно разгружали, при этом он возвращал накопленную неупругую деформацию за счет механизма СЭ ( $\gamma_{СЭ}$ ) (участок CD). После чего образец нагревали до температуры 373 К для снятия остаточных напряжений, при этом образец восстанавливал накопленную неупругую деформацию за счет механизма ЭПФ (участок DE). Эксперимент повторяли при четырех температурах: 273 К, 290 К, 303 К, 323 К. При этих температурах материал образцов находился в различных структурных состояниях: при  $T = 273$  К – в мартенситном состоянии с B19' структурой, при  $T = 290$  К – в двухфазном состоянии B2+B19', при  $T = 303$  К и 323 К в аустенитном состоянии с B2 структурой [7].

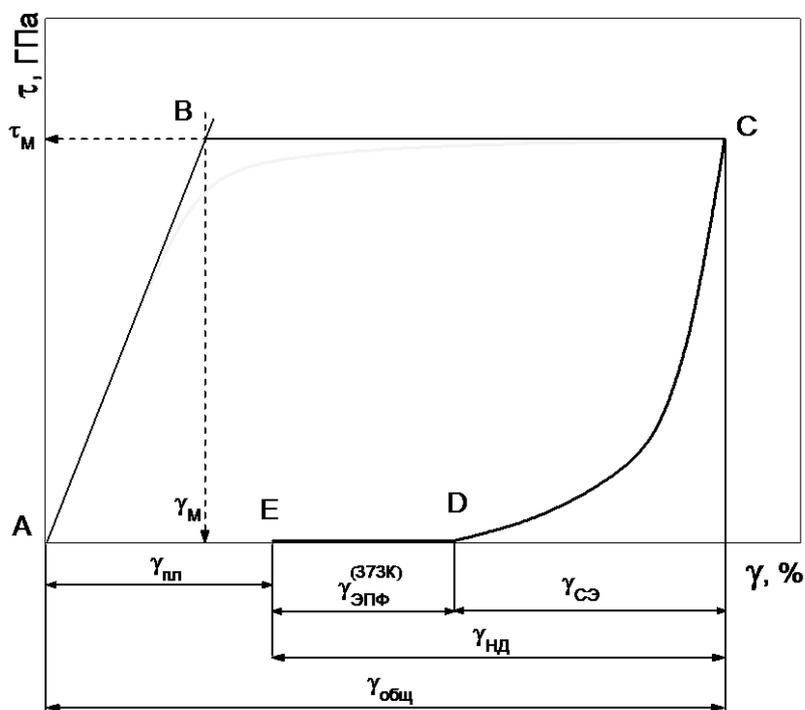


Рис.8 – Схема типичной диаграммы деформирования кручением в сплаве TiNi с указанием деформационных параметров СЭ [7]

Диаграммы нагружения записывали с помощью графопостроителя в виде кривых, схематически показанных на рисунке 8. Здесь  $\tau_M$  – напряжение мартенситного сдвига (фазовый предел текучести),  $\gamma_M$  – соответствующая ему деформация,  $\gamma_{пл}$  – накопленная в процессе испытания пластическая деформация, отсчитываемая относительно исходного положения образца (участок EA). На линейном участке АВ деформационное поведение материала подчиняется закону Гука, что позволяет рассчитать модуль сдвига  $G$  исходной фазы (B2 или B19') материала в образцах, находившихся в однофазных состояниях перед испытаниями, по формуле:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\tau_M}{\gamma_M} \quad (2.1).$$

Величина восстановленной неупругой деформации ( $\gamma_{нд}$ ) определялась как сумма вкладов в деформацию, восстановленную за счет механизмов СЭ ( $\gamma_{СЭ}$ ) и ЭПФ ( $\gamma_{ЭПФ}$ ) по формуле:

$$\gamma_{нд} = \gamma_{СЭ} + \gamma_{ЭПФ} \quad (2.2).$$

Для сопоставления результатов влияния поверхностной обработки на параметры СЭ и ЭПФ более удобными являются относительные деформационные параметры  $\eta_{СЭ}$ ,  $\eta_{ЭПФ}$ ,  $\eta_{пл}$ , имеющие смысл степеней возврата или параметров формовосстановления неупругой деформации, обусловленных соответствующими механизмами, которые рассчитывались по формулам:

$$\eta_{СЭ} = \frac{\gamma_{СЭ}}{\gamma_{общ}} \quad (2.4);$$

$$\eta_{ЭПФ} = \frac{\gamma_{ЭПФ}}{\gamma_{общ}} \quad (2.5);$$

$$\eta_{пл} = \frac{\gamma_{пл}}{\gamma_{общ}} \quad (2.6),$$

где  $\eta_{СЭ}$  и  $\eta_{ЭПФ}$  – степени восстановления деформации за счет СЭ и ЭПФ соответственно,  $\eta_{пл}$  – степень накопленной пластической деформации.

Общую деформацию рассчитывали по формуле:

$$\gamma_{\text{общ}} = N \frac{r_{\text{cp}}}{l \cdot R} \quad (2.7),$$

где  $N$  – угол закручивания образца,  $r_{\text{cp}}$  – половина его поперечного сечения,  $l$  – длина рабочей части образца,  $R$  – постоянный параметр, учитывающий геометрию установки.

Схема 2: Образец закрепляли в установке и при постоянной температуре 273 К деформировали до величины деформации  $\gamma_{\text{общ}} = 6\%$  ( $\sigma_{\text{деф}}$  на рис. 9) (расчет деформации проводился по формуле (2.7)). После чего образец нагревали до температуры 573 К (12), а генерируемые при этом напряжения, фиксировали графопостроителем в виде диаграмм температурных зависимостей развиваемых образцом усилий (реактивных напряжений).

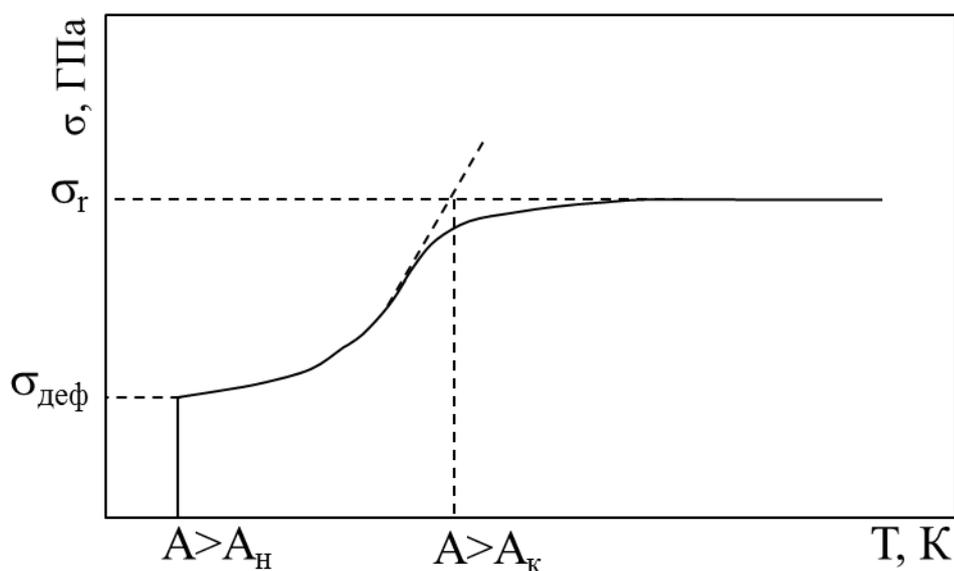


Рис.9 – Температурная зависимость генерируемого напряжения при нагреве деформированного образца из сплава TiNi в заневоленном состоянии

## 2.3 Методы исследования оптической микроскопии

Одним из методов исследования морфологии поверхности материала в данной работе являлась оптическая микроскопия. Как правило, для наблюдения в отраженном свете структур различных поверхностей удобны инвертированные микроскопы. Они отличаются от микроскопов проходящего света тем, что объектив располагается под наблюдаемым предметом, а конденсор – сверху. Направление хода лучей, прошедших сверху вниз через объектив, изменяется системой зеркал, и в глаз наблюдателя они попадают, как обычно, снизу-вверх (рис. 10).

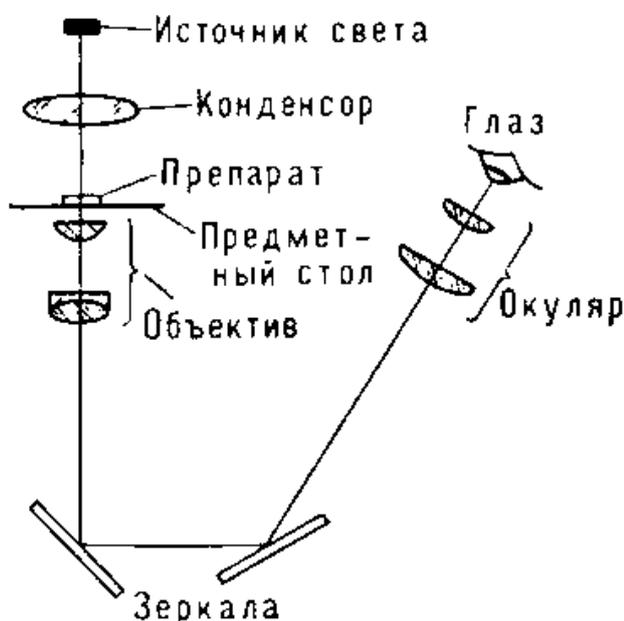


Рис. 10. Принципиальная оптическая схема инвертированного микроскопа

Структуру материала можно различить лишь тогда, когда разные его частицы по-разному поглощают или отражают свет, либо отличаются одна от другой (или от окружающей среды) показателем преломления. Эти свойства обуславливают разницу амплитуд и фаз световых волн, прошедших через различные участки препарата, от чего, в свою очередь, зависит контрастность изображения. Поэтому методы наблюдения выбираются в зависимости от характера и свойств изучаемых объектов. В этой работе использовались

методы светлого поля, темного поля и дифференциально-интерференционного контраста.

**Метод светлого поля.** Данный метод наблюдения является основным для всех типов микроскопов: в поле зрения на светлом фоне наблюдается контрастное однотонное или естественное цветное изображение объекта. Метод светлого поля позволяет исследовать непрозрачные и отражающие свет объекты, такие как: тонкие шлифы металлов или минералов, руд и т.д. В данном случае освещение объекта производится через объектив после того, как свет от источника поступает на отражательную сторону полупрозрачного зеркала. Затем, отразившись от объекта, свет снова проходит через объектив и полупрозрачное зеркало, которое в данном случае (в направлении оптической оси) его пропускает. Так как разные участки объекта по-разному отклоняют падающий на них свет, а отраженные лучи имеют различную интенсивность, на выходе будет получено достоверное изображение объекта. [41]

**Метод темного поля.** Метод темного поля широко применяется для исследования пористых материалов, выявлении структурных факторов, влияющих на склонность материалов хрупкому разрушению, оценки масштаба и характера коррозионных поражений, выявления царапин на поверхности материала, исследования на наличие неметаллических включений, оценки натуральных цветов объектов после окрашивания. [41]

Метод основан на эффекте, который достигается освещением объекта полым конусом света, внутренняя апертура которого должна превосходить числовую апертуру применяемого объектива.

Таким образом, ни один прямой луч не попадает в объектив: при отсутствии объекта видимое поле в микроскопе будет темным, а при его наличии будет наблюдаться следующая картина - на темном фоне в отраженном или рассеянном (диффузно отраженном) свете присутствует яркое блестящее свечение контура вокруг объекта.

Для создания темного поля в микроскопе проходящего света применяются:

1. щелевой метод;
2. метод, реализуемый (рис. 11) за счет перекрытия осветительной апертуры конденсора (материальной диафрагмой) и выходного зрачка объектива (проекцией изображения материальной диафрагмы). Конденсор должен иметь непрозрачный диск, расположенный в плоскости апертурной диафрагмы, закрывающий центральный пучок света. В объективе может быть вкладыш или регулируемая ирисовая диафрагма, которые обязательно должны располагаться в определенном месте - выходном зрачке объектива. С помощью этих устройств можно уменьшать выходное отверстие объектива (выходную числовую апертуру объектива);
3. получение темного поля с помощью специального конденсора темного поля.

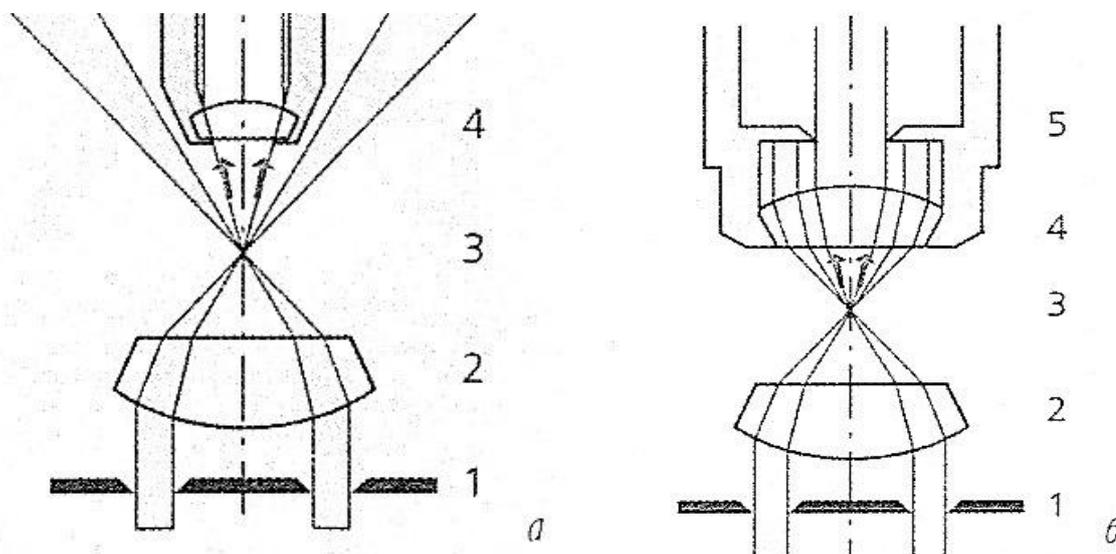


Рис. 11. Оптическая схема получения эффекта темного поля: *а* - с помощью диафрагмы, расположенной в плоскости апертурной диафрагмы, при этом создается световой поток, который не попадает в объектив; *б* - с помощью диафрагмы, расположенной в плоскости апертурной диафрагмы конденсора и ирисовой диафрагмы, расположенной в объективе; 1 - диафрагма темного поля (плоскость апертурной диафрагмы конденсора); 2 - оптика конденсора; 3 - плоскость предмета; 4 - объектив; 5 - ирисовая диафрагма внутри объектива.

**Метод дифференциально-интерференционного контраста.** Метод основывается на поляризационных свойствах света. В созданный с помощью скрещенных поляроидов поляризованный свет вводятся две двулучепреломляющие призмы (призмы Волластона): одна - в конденсор, вторая - вблизи выходного зрачка объектива. Призма конденсора осуществляет. После прохождения пучков через объект вторая призма вновь соединяет пучки. При прохождении через объект оба частичных пучка либо не приобретают дополнительной разности хода (одинаковые структуры), либо, при наличии разных структур, пучки получают различные разности хода. Так как свет поляризованный, то анализатор выбирает из смещенных по фазе волновых компонентов те, которые лежат в направлении его колебаний (рис. 12).

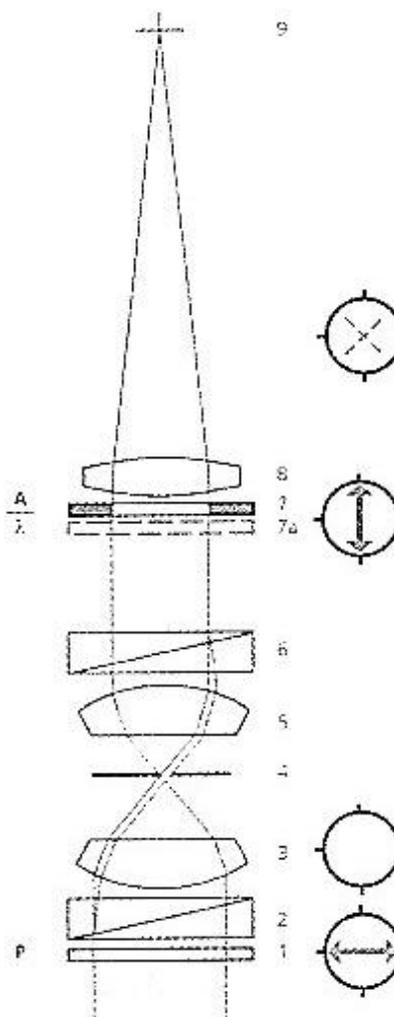


Рис. 12. Оптическая схема создания дифференциально-интерференционного контраста в микроскопе проходящего света: 1 – поляризатор; 2 – двулучепреломляющая призма

конденсора; 3 – конденсор; 4 – предмет; 5 – объектив; 6 – двулучепреломляющая призма объектива; 7 – анализатор; 7*a* –компенсаторная пластинка А; 8 – тубусная линза.

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1 Морфология поверхности образцов $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$ с покрытиями, сформированными методами магнетронного осаждения, ионной имплантации и электронно-пучковой обработки

На полученных с помощью оптической микроскопии изображениях (рис. 13) присутствуют четко различимые частицы второй фазы, которые распределены равномерно по поверхности. Согласно данным рентгеновского анализа, полученным в лаборатории, частицы принадлежат фазе  $Ti_2Ni$ . Мартенситного рельефа не наблюдается.

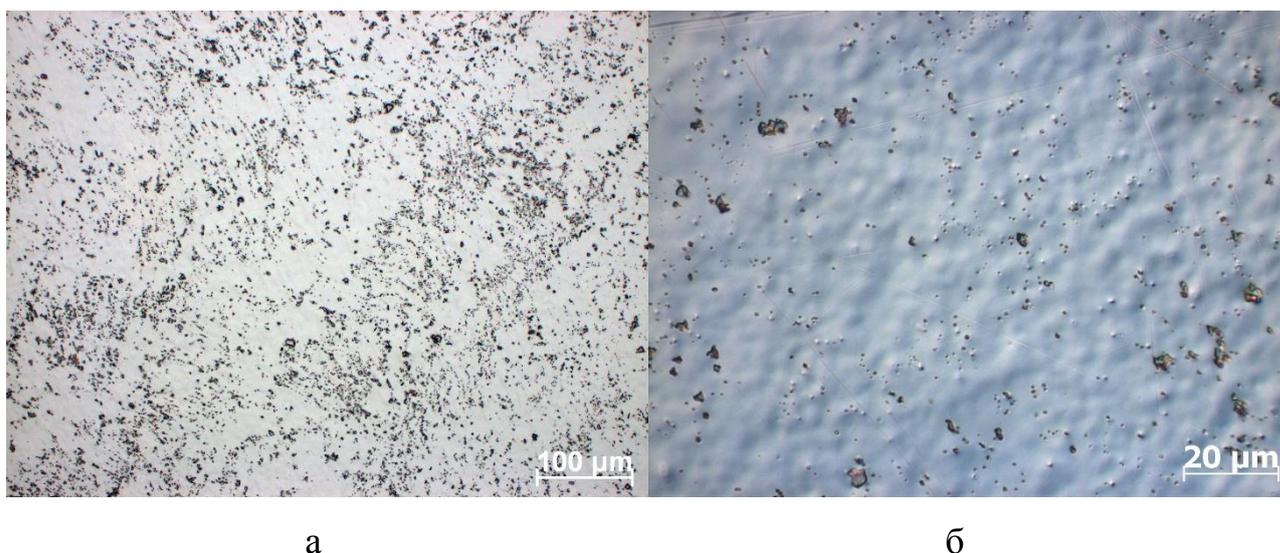


Рис. 13. Морфология поверхности исходного образца  $TiNi$  при увеличении  $\times 200$  (а) и  $\times 1000$  (б)

На представленных изображениях (рис. 14) показана морфология поверхности образца после воздействия НСЭП. Наблюдаемый рельеф характерен для всей поверхности образца с данной обработкой. Как видно, обработка приводит к формированию кратеров, размер которых колеблется в диапазоне от 30-40 мкм, присутствуют единичные кратеры размерами до 150-170 мкм. Зачастую при обработке электронным пучком формируется

мартенситный рельеф с характерными полосами. Даже на фотографии рис.16б, снятой при большем увеличении на участке без кратеров, мартенситный рельеф не наблюдается.

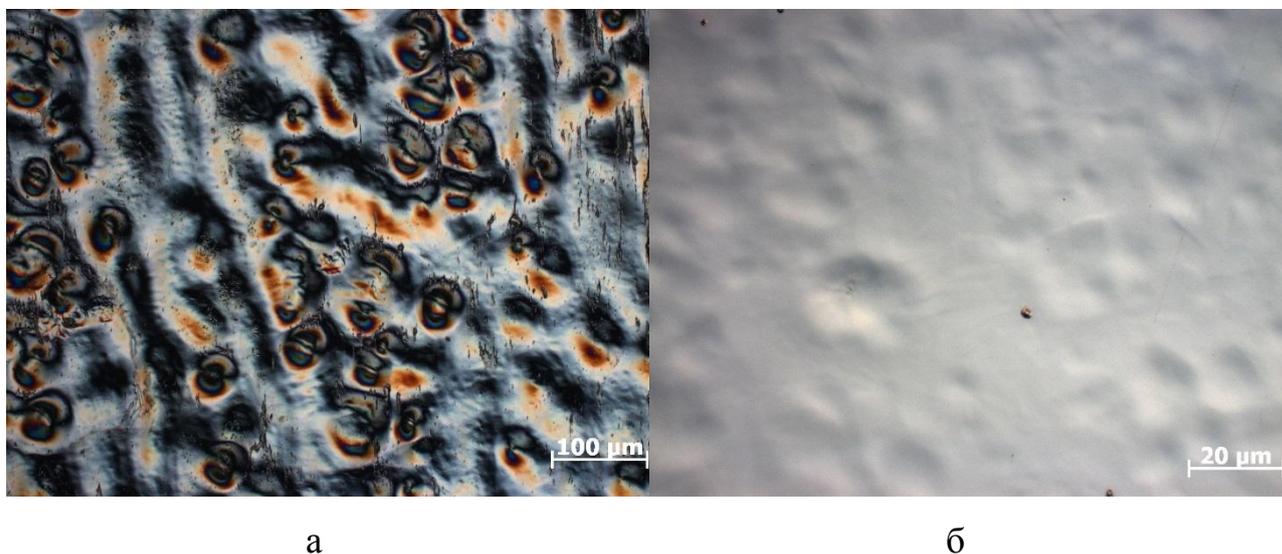
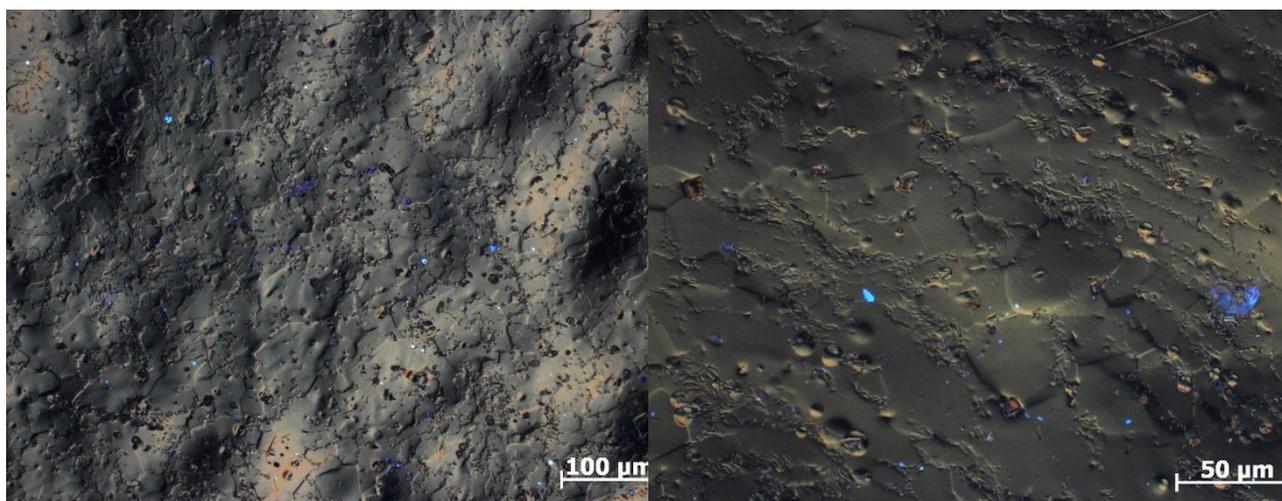


Рис. 14. Морфология поверхности образца TiNi с обработкой НСЭП при увеличении x200 (а) и x1000 (б)

Обработка пучками ионов Si (рис.15) приводит к тому, что изменяется рельеф наружного слоя покрытия: чётко различимыми становятся границы зёрен на поверхности, что дает возможность оценить их размеры. В результате обсчета фотографий было установлено, что зерна имеют равноосную форму с размерами в диапазоне ~15-40 мкм, что мало отличается от размеров зерен в исходном образце (~20-25 мкм). Частицы второй фазы на поверхности также сохраняются.

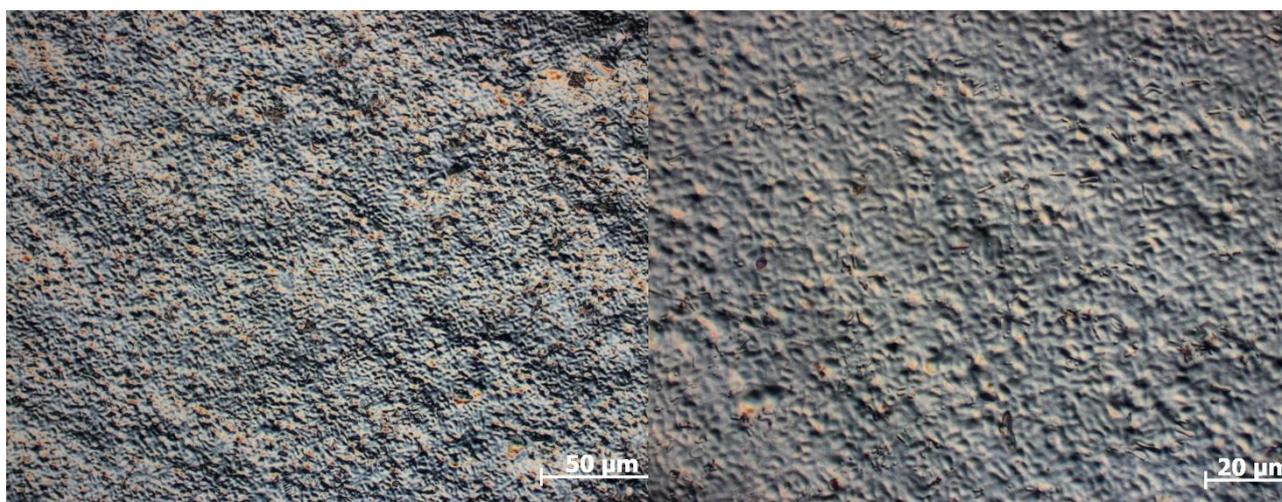


а

б

Рис. 15. Морфология поверхности образца TiNi с обработкой пучками ионов Si при увеличении  $\times 200$  (а) и  $\times 500$  (б)

Обработка пучками ионов Mo (рис. 16) не привела к обособлению границ зёрен на поверхности образца. Изображение с большим увеличением (рис. 16б) показывает появление микрорельефа, не характерного для исходного образца характерный размер впадин изменяется в диапазоне 1-5 мкм. Это может быть связано с воздействием более тяжелыми ионами Mo, по сравнению с ионами Si. Видно, что сохранены частицы второй фазы, но их размеры и количество уменьшилось.



а

б

Рис. 16. Морфология поверхности образца TiNi с обработкой пучками ионов Mo при увеличении x500 и x1000

Визуальная оценка образцов после обработки пучками ионов Ta (рис. 17) показала, схожесть с обработкой пучками ионов Mo. Здесь так же неразличимы границы зерен. Также характерные размеры элементов микрорельефа более однородны по размерам. На поверхности образца методами оптической микроскопии выявить наличие частиц второй фазы не удалось.

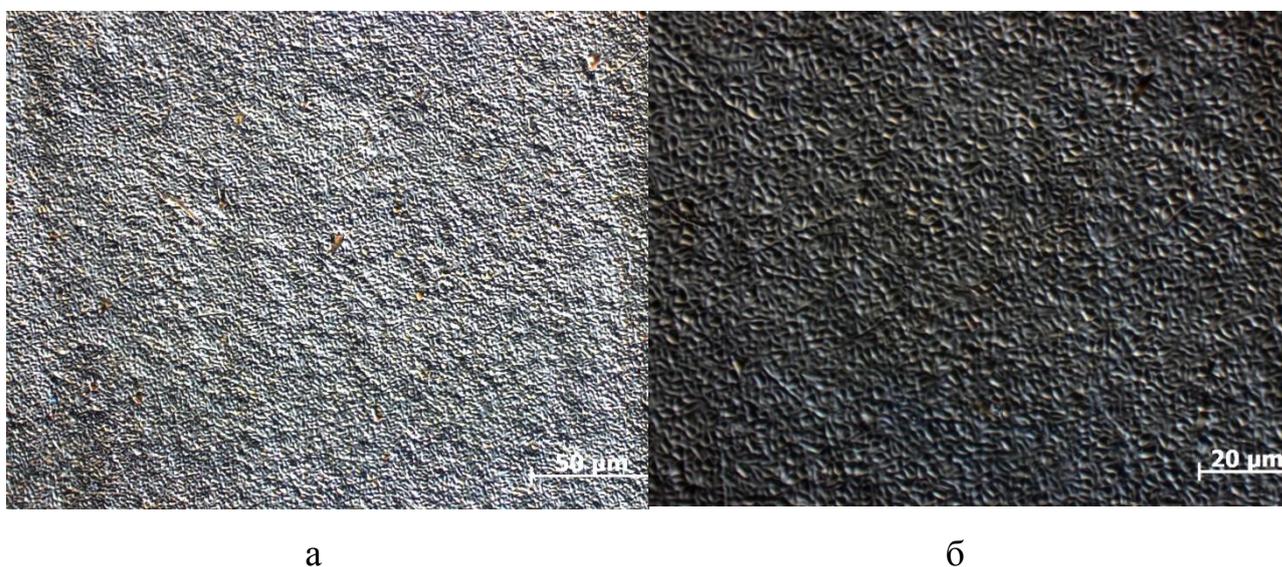
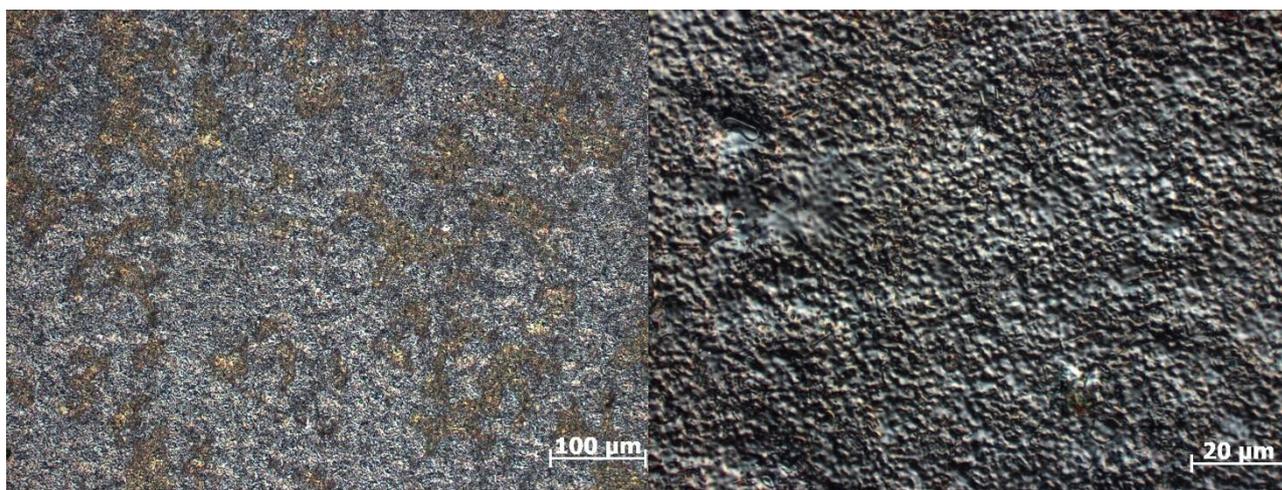


Рис. 17. Морфология поверхности образца TiNi с обработкой пучками ионов Ta при увеличении x500 (а) и x1000 (б)

После магнетронного осаждения молибдена поверхность приобретает шероховатый рельеф, присутствует капельная фракция, характерная для методики формирования покрытия магнетронным осаждением. Поры и трещины в покрытии отсутствуют.

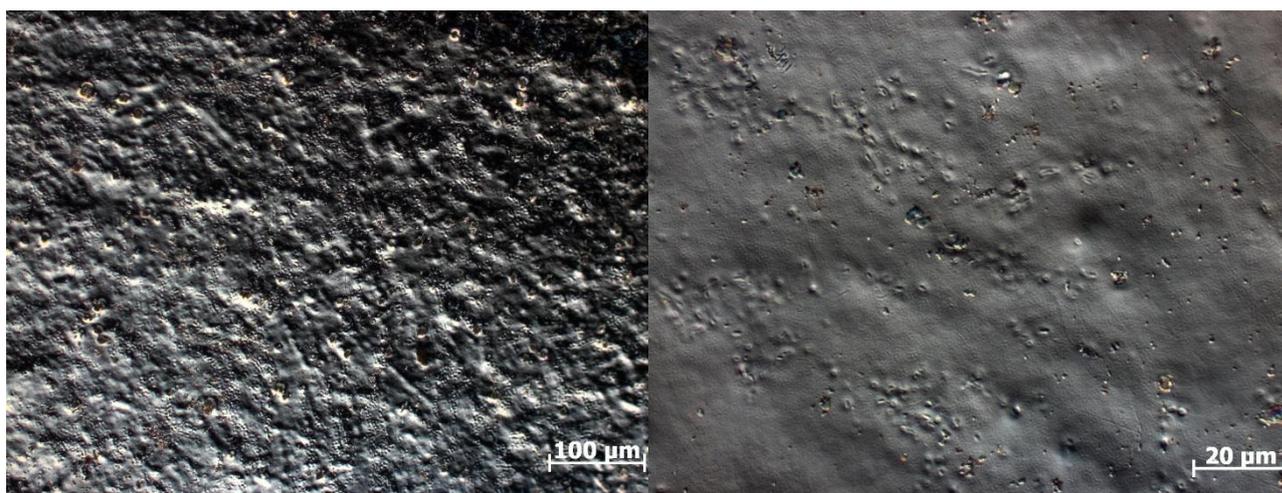


а

б

Рис. 18. Морфология поверхности образца TiNi с покрытием из Mo при увеличении x200 (а) и x1000 (б)

В результате магнетронного осаждения Ta на поверхности сплава на основе никелида титана сформировалось покрытие, под которым просматриваются частицы второй фазы (рис.19). Также капельная фракция присутствует в достаточно малом количестве. Покрытие повторяет рельеф поверхности образца, отличается равномерным сплошным распределением и отсутствием пор и трещин.



а

б

Рис. 19. Морфология поверхности образца TiNi с покрытием из Ta при увеличении x200 и x1000

### 3.2 Исследование морфологии поверхности $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$ исходных образцов и после НСЭП обработки до и после нагружения

Как уже отмечалось выше, на изображениях (рис. 20 а, б) поверхность исходного образца  $TiNi$  до деформирования характеризуется гладким рельефом, равномерным распределением частиц второй фазы по поверхности, и отсутствием мартенситного рельефа.

После деформирования на поверхности исходных образцов (рис. 20 в, г) вследствие прямого и обратного МП появляется мартенситный рельеф в виде параллельных полос. Границы зерен не различаются.

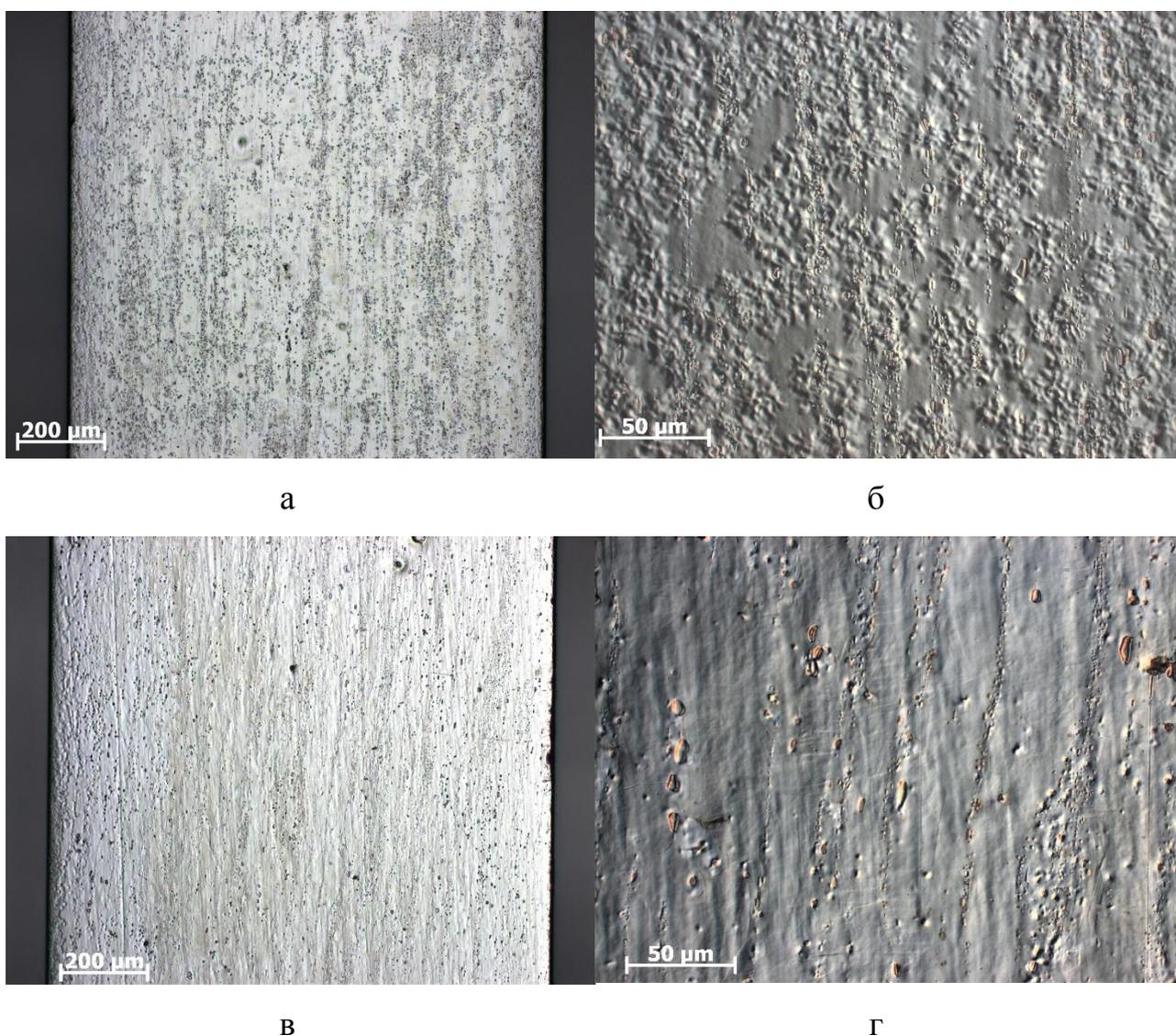
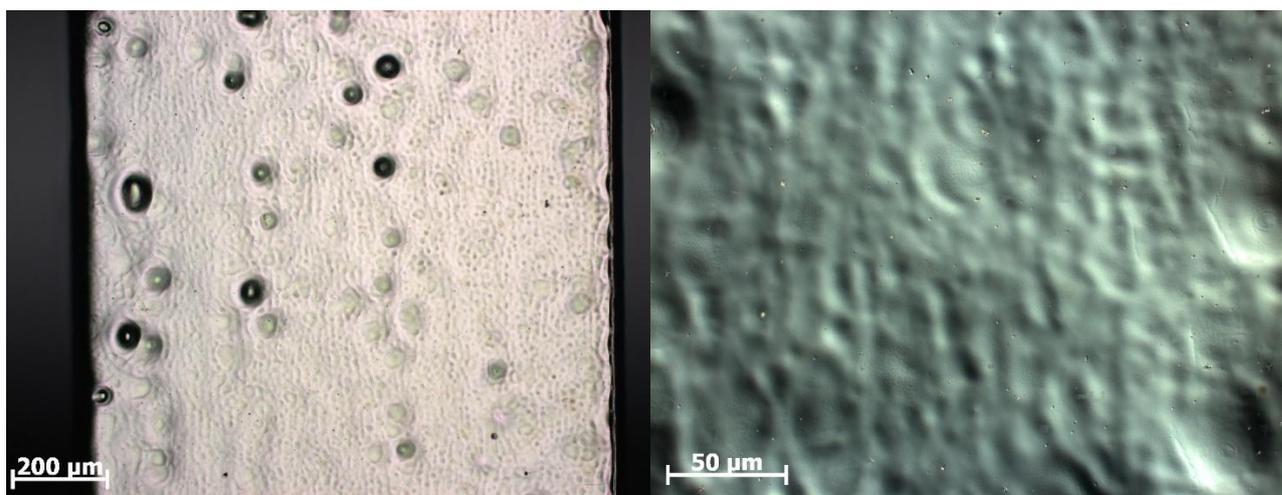


Рис. 20. Морфология поверхности исходного образца  $TiNi$  при увеличении  $\times 100$  и  $\times 500$  до (а, б) и после (в, г) деформирования

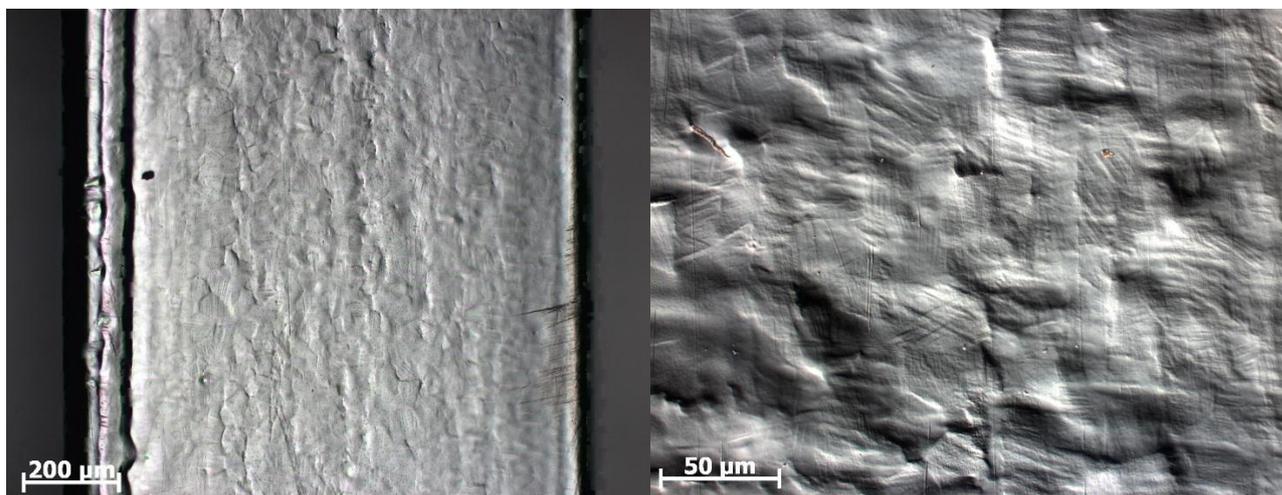
На изображениях (рис. 21) показана морфология поверхности образца с обработкой НСЭП на установке SOLO до (рис.21 а, б) и после (рис.21 в, г) деформирования.

На поверхности образца до деформирования наблюдаются кратеры, характерные для рельефа образцов с обработкой НСЭП. Здесь мартенситный рельеф формируется и проявляется более отчетливо только после деформирования образцов (рис. 21 в, г). Зерна ориентированы по-разному, но мартенсит направленно формируется вдоль приложенной нагрузки.



а

б



в

г

Рис. 21. Морфология поверхности образца TiNi с обработкой НСЭП при увеличении  $\times 100$  и  $\times 500$  до (а, б) и после (в, г) деформирования

### 3.3 Влияние имплантации ионов Si, Mo, Ta на механическое поведение образцов TiNi при деформировании кручением при различных температурах

На рисунке 22 представлены диаграммы накопления деформации при увеличении нагрузки и ее возврата при разгрузке образцов сплава  $Ti_{49,5}Ni_{50,5}$  с ионными покрытиями и без них.

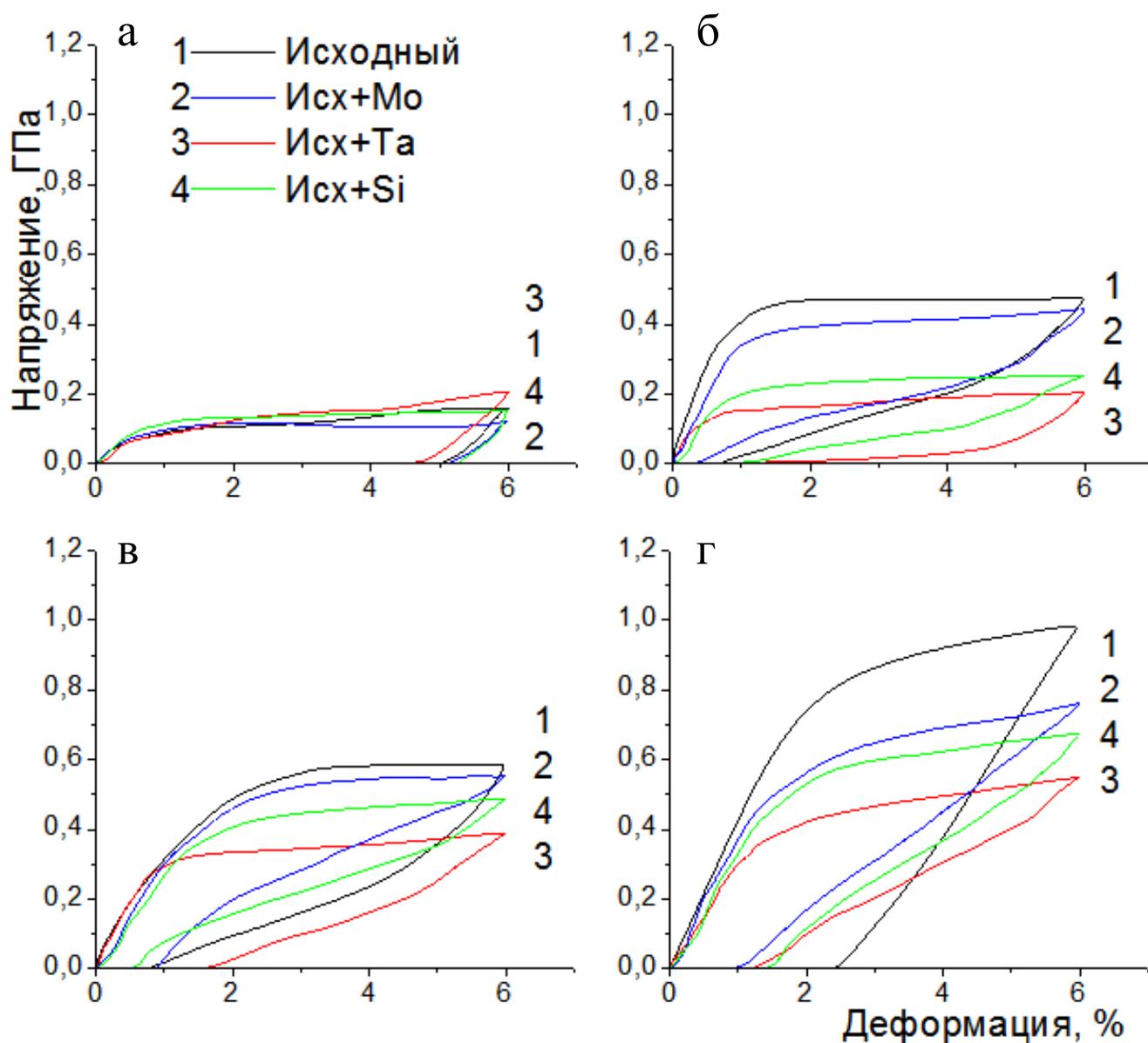


Рис. 22. Диаграммы накопления и возврата деформации в образцах TiNi 1 – без обработки, 2 – с обработкой пучками ионов Si, 3 – с обработкой пучками ионов Mo, 4 – с обработкой пучками ионов Ta при температурах а – 273 К, б – 290 К, в – 303 К, г – 323 К.

При температуре испытания  $T_{исп}=273$  К (рисунке 22 а) ниже температуры начала обратного МП образцы находятся в мартенситном состоянии. Деформационные кривые образцов, обработанных пучками ионов, мало отличаются от кривых образцов без обработки.

При повышении температуры испытаний (рисунке 22 б, в) образцы имеют структуру  $B2+B19'$ , при этом начинает проявляться наличие модифицированной поверхностной области. Наибольшее влияние оказывает обработка ионами Ta – напряжение начала мартенситной текучести в этих образцах снизилось в 3-2 раза. Обработка ионами Si снижает значения этой величины на 2-1,5 раза. В образцах с обработкой ионами Mo наблюдается незначительное снижение напряжений мартенситной текучести по сравнению с образцами без обработки.

На рисунке 22 г видно, что в исходном образце TiNi при  $T_{исп}=323$  К не наблюдается горизонтальной площадки мартенситной текучести, наличие которой обусловлено мартенситным превращением  $B2 \rightarrow B19'$  а накопление неупругой деформации выше упругой области происходит при повышении приложенных напряжений, что может быть обусловлено появлением новых порций мартенсита (мартенсита напряжения). На деформационных кривых образцов с обработкой ионами поверхностями также площадка мартенситной текучести отсутствует. Однако закономерность снижения уровня напряжений при деформации в модифицированных образцах сохраняется. Так, при деформации равной 6 % уровень напряжений в образцах с ионно-пучковой обработкой снижается на 25% - для ионов Mo, на 33% - для ионов Si и на 45% - для ионов Ta.

Отсутствие прямой закономерности между порядковым номером (атомным весом) имплантируемого иона и величиной усилий, возникающих в образце при внешнем деформирующем воздействии, может свидетельствовать не только об уровне сформированных внутренних напряжений или изменении дефектной подсистемы, но и об образовании новых фаз на основе Ti, Ni и имплантируемого иона.

### 3.4 Влияние покрытий Мо и Та на механическое поведение $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$ при деформировании кручением при различных температурах

На рисунке 23 изображены диаграммы накопления деформации в образцах  $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$  без покрытий и с покрытиями из молибдена и тантала, сформированных методом магнетронного осаждения.

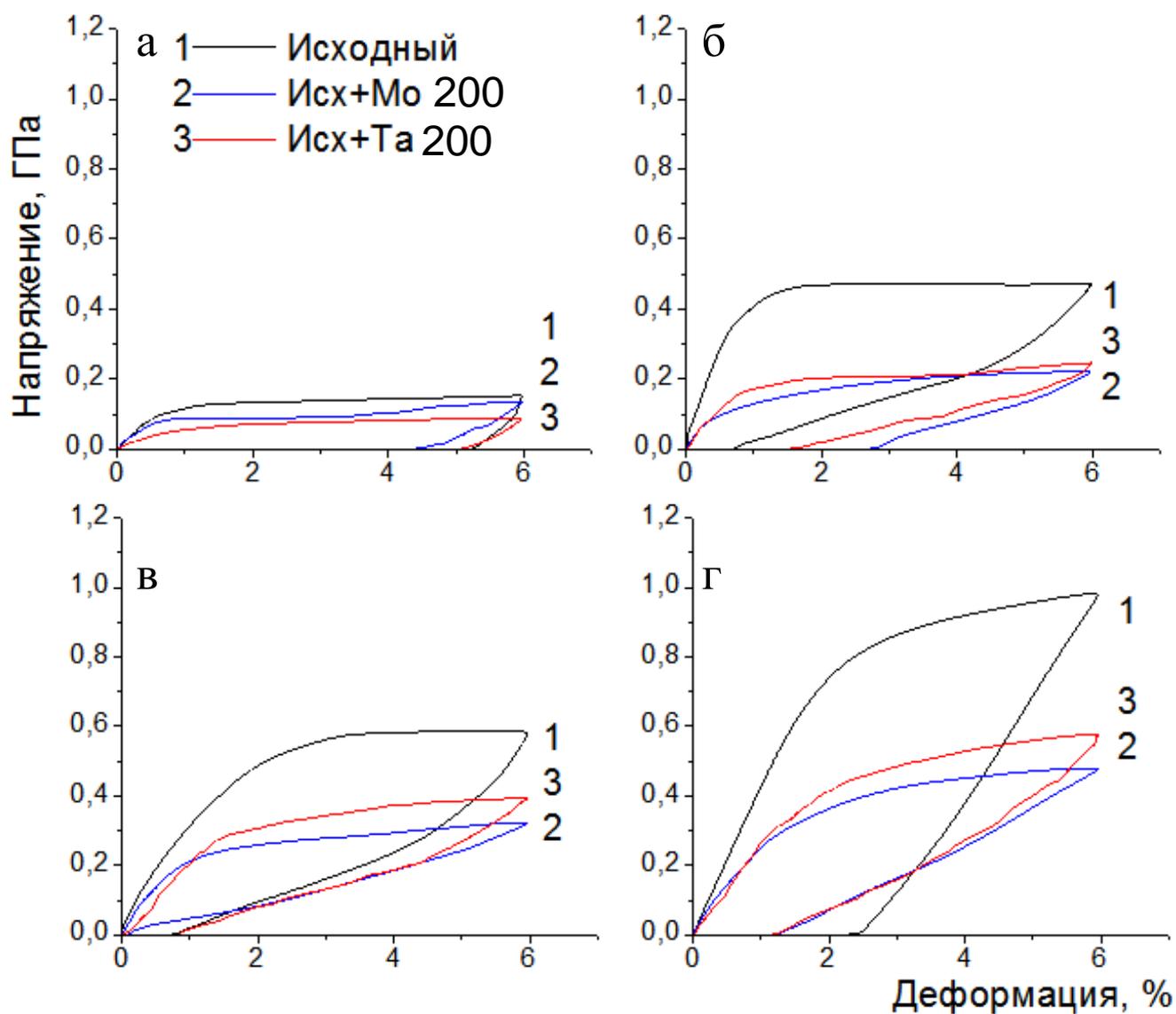


Рис. 23. Диаграммы накопления и возврата деформации в образцах  $TiNi$  1 – без покрытия, 2 – с покрытием из Мо, 3 – с покрытием из Та при температурах а – 273 К, б – 290 К, в – 303 К, г – 323 К.

Даже при низкой температуре испытаний (рисунке 23 а) наблюдается значительное снижение (на 35-45%) уровня средних напряжений,

развиваемых образцами с покрытиями, при этом площадка мартенситной текучести сохраняется.

При повышении температуры испытаний (рисунке 23 б, в, г) наблюдается еще большее снижение уровня средних напряжений (на 40-60%) по сравнению с образцом без покрытий, а площадку мартенситной текучести, наблюдаемую при температуре испытаний  $T_{исп}=290$  К, при  $T_{исп}=303$  и 323 К уже сложно выделить.

Отсутствие площадки мартенситной текучести начиная с температуры испытаний  $T_{исп}=303$  К может свидетельствовать о изменении температур МП, по крайней мере, в приповерхностном модифицированном слое, на 10-20 К по сравнению с исходным образцом и может быть связано с малой величиной задаваемой деформации.

При температурах испытаний  $T_{исп}=303$  и 323 К наблюдается различие в величине развиваемых образцами с покрытиями усилий. Большее усилие развивают образцы с покрытиями из Мо по сравнению с образцами с покрытиями из Та. После проведенных испытаний на кручение при различных температурах образцов с покрытиями на них было проведено исследование состояния покрытий методом оптической металлографии (в работе не приводится). На покрытия из Мо наблюдались только трещины, тогда как покрытие из Та растрескалось и частично (около 50 % поверхности образца) отслоилось, а на поверхности материала основы также обнаружили трещины. Таким образом, разная адгезионная способность покрытий и их состояния, вероятно, являются причинами наблюдаемых на деформационных кривых различий величин развиваемых напряжений.

При всех температурах испытаний покрытия молибдена и тантала значительно снижают напряжения мартенситных сдвигов (на ~40–50%), что так же может зависеть от изменения химического состава поверхностного слоя никелида титана, граничащего с покрытием, либо от наличия остаточных упругих напряжений в сопряженных слоях. Причем осаждение молибдена снижает напряжения несколько больше, чем осаждение тантала.

### 3.5 Влияние электронно-пучковой обработки $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$ на механическое поведение при деформировании кручением при различных температурах

На рисунке 24 приведены графики накопления деформации при увеличении нагрузки и ее возврата при разгрузке образцов сплава  $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$ , облученных электронным пучком на установке SOLO и исходных образцов без облучения поверхности.

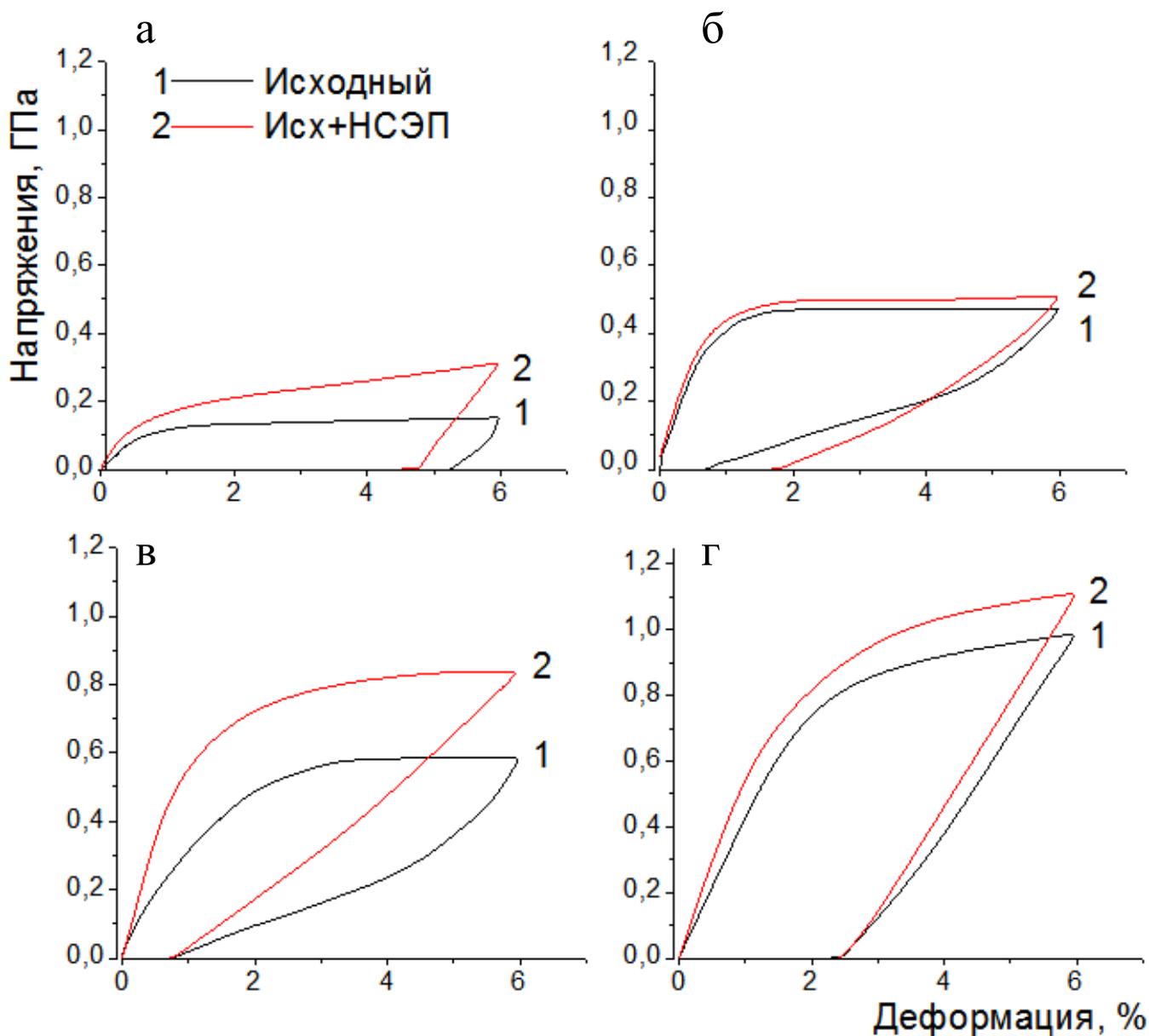


Рис. 24. Диаграммы накопления и возврата деформации в образцах  $TiNi$  1 – без обработки, 2 – с обработкой НСЭП Та при температурах: а – 273 К, б – 290 К, в – 303 К, г – 323 К.

Обращает внимание, что на всех деформационных кривых образцов с обработанной электронным пучком поверхностью упругий участок имеет более крутой наклон, что свидетельствует об увеличении модуля упругости. Уже при температуре  $T_{исп}=273$  К наблюдается заметное увеличение уровня средних напряжений в облученных образцах, которые в последующих циклах испытаний при более высоких температурах, остаются неизменно выше таковых для исходного материала.

Форма кривых с модифицированной поверхностью довольно точно повторяет кривые образцов без обработки, что может говорить лишь о формировании напряженного слоя в образцах. Сохранение горизонтальной площадки накоплением деформации указывает на преимущественно мартенситный характер превращения  $B2 \rightarrow B19'$ .

Данный вид обработки отличается от описанных выше методов обработки поверхности повышенными значениями напряжений мартенситного сдвига (20–30% выше) по сравнению с образцами без обработок.

### 3.6 Влияние модификации поверхности сплава $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$ на генерацию реактивных напряжений

На рис. 25 представлены диаграммы развиваемых реактивных напряжений при повышении температуры в образцах  $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$  без покрытий, после испытаний на сверхэластичность и с различными модифицированными поверхностями.

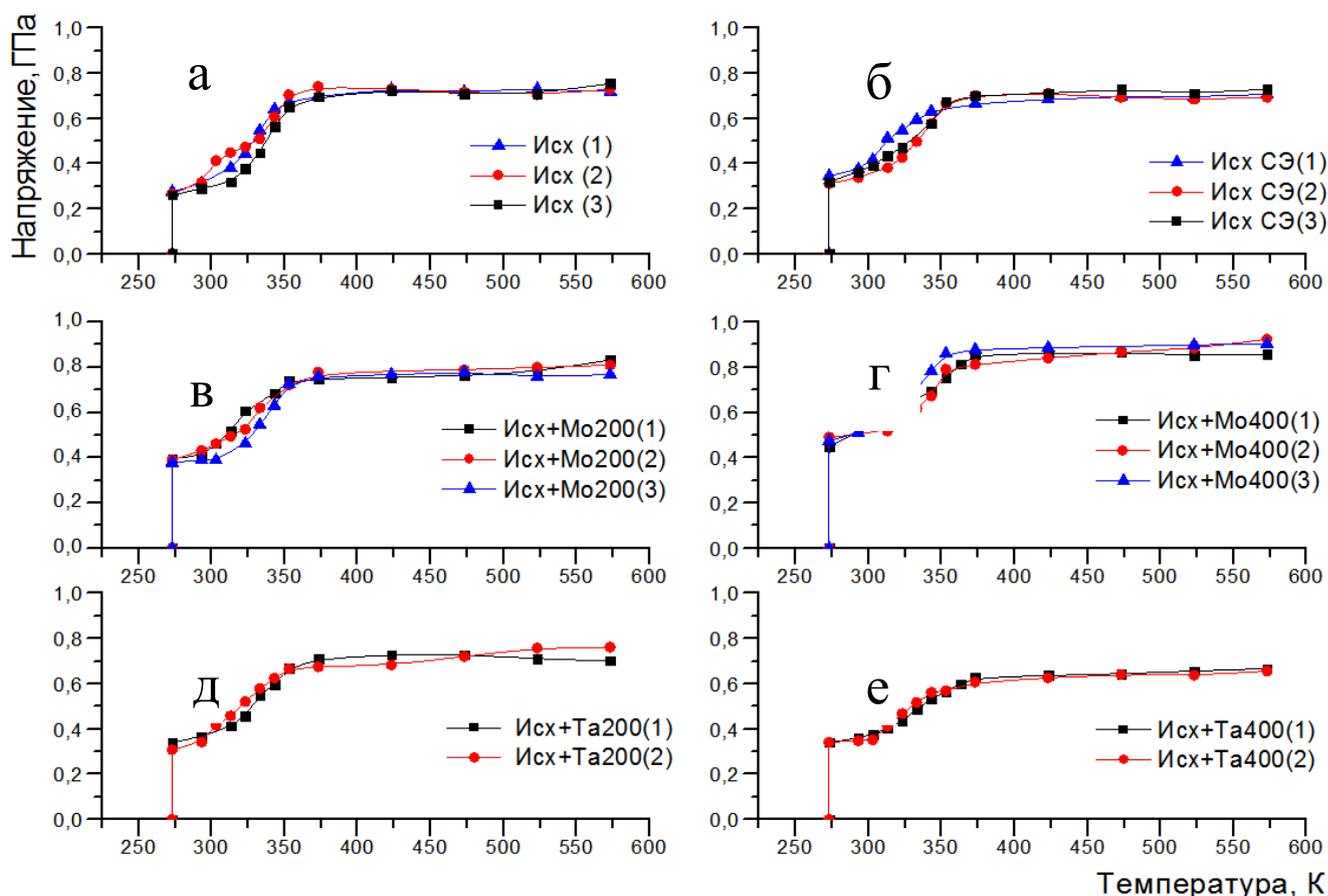


Рис. 25. Температурные зависимости развиваемых реактивных напряжений в образцах  $TiNi$  а – без обработки, б – без обработки и после испытаний на СЭ, в – с покрытием из Мо толщиной 200 нм, г – с покрытием из Мо толщиной 400 нм, д – с покрытием из Та толщиной 200 нм, е – с покрытием из Та толщиной 400 нм.

Согласно схеме испытания 2 при температуре  $T=273$  К образцы находятся в мартенситном состоянии, в котором образец деформировали кручением до 6%, а затем жестко зафиксировали. При нагреве образца в его

объеме происходит образование аустенитной фазы. По причине жесткой фиксации образца изменение формы невозможно, однако развиваемые усилия удастся фиксировать с помощью тензодатчиков. По данной схеме была проведена оценка влияния поверхностной модификации сплава на основе TiNi различными состояниями на величины реактивных напряжений.

Для испытаний по схеме 2 были взяты образцы без покрытий и с покрытиями, прошедшие испытания по схеме 1. Несмотря на то, что предварительная деформация состояла из 4-х циклов деформирования до 6 % при различной температуре (см. схему испытаний 1), результирующая величина пластической составляющей деформации в этих образцах не превышала 1%.

На рис. 25а видно, что образцы с исходной поверхностью (после электролитической полировки) при нагревании от 273 К до 573 К развивают реактивные напряжения до величин  $\approx 720$  МПа, тогда как те же образцы, но после испытаний на сверхэластичность, развивают реактивные напряжения  $\approx 680$  МПа. Снижение уровня реактивных напряжений может быть обусловлено тем, что в результате предварительных испытаний на СЭ в образце сформировались предпочтительные ориентации (направления) для деформирования кручением, препятствующие развитию реактивных напряжений в полном объеме.

Как видно из рис. 25 в, г и рис. 26 наличие покрытия из молибдена обеих толщин повышает величины развиваемых реактивных напряжений в образцах TiNi, причем влияние покрытия тем значительнее, чем больше его толщина (+6% для 200 нм и +18% для 400 нм толщины покрытия). Образцы же с покрытиями из тантала толщиной 200 нм и 400 нм развивают при тех же условиях реактивные напряжения ниже на 3% и на 14%, соответственно.

Температуры, соответствующие выходу реактивных напряжений на горизонтальную площадку приведены на рис. 27. Определение температур проводилось графически с помощью построения касательных. Как видно, для всех образцов эти температуры находятся в области 360 К и можно сделать

выводы о том, что модификация поверхности образца не оказывает значительного влияния на температуры стабилизации напряжений.

В начале испытания по схеме 2 происходит деформирование образца до 6%, при этом образец сопротивляется внешнему закручиванию с усилием  $\sigma_{\text{деф}}$ . Как видно из рисунка рис. 26 как деформационная предыстория образца, так и наличие покрытия приводит к увеличению значения  $\sigma_{\text{деф}}$ . Эти результаты можно объяснить увеличением твердости поверхностного слоя, которое показано в работе [42]. Результаты, приведенные в указанной статье, коррелируют с данными, полученными в данной работе.

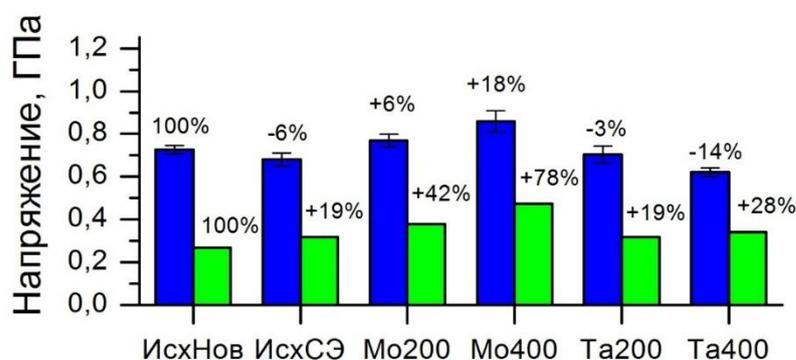


Рис. 26. Величины максимальных развиваемых напряжений и напряжения при деформации 6% в образцах без покрытий и с различными покрытиями.

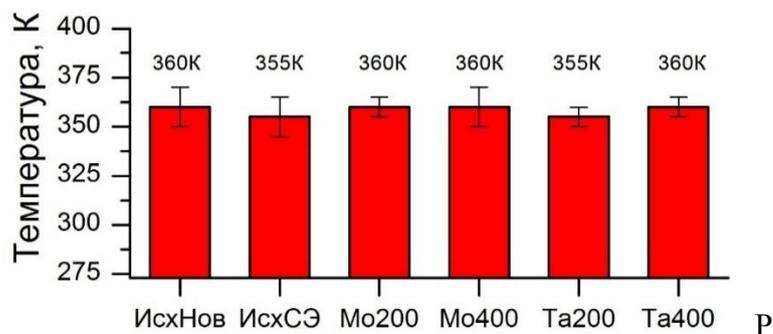


Рис. 27. Температура, соответствующая выходу реактивных напряжений на горизонтальную площадку

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ72	Макаров Андрей Александрович

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	Наноматериалы и нанотехнологии

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

<i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Суммарные затраты на проведение научного исследования составили 111 973,4 руб</i>
<i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Научно-исследовательская работа ранее не проводилась, поэтому нормы и нормативы расходования ресурсов отсутствуют</i>
<i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Согласно п.3 п.п.16 ст. 149 НК РФ данная НИИР не подлежит налогообложению. На основании п. 1 ст. 58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2015 году вводится пониженная ставка для расчета отчислений во внебюджетные фонды – (20 – 22) % от фонда оплаты труда.</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i>	<i>Оценка перспективности исследования, потенциальные потребители результатов, SWOT-анализ проекта</i>
<i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>В ходе работы были рассчитаны все затраты на проведение исследования, эти результаты можно будет использовать для более грамотного формирования бюджета в будущем.</i>
<i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>По результатам НИИР были выполнены поставленные задачи. Однако, поскольку данная НИИР относится к исследовательским работам, то оценивать её эффективность преждевременно. Эффективность может быть определена только после проведения исследований в условиях эксплуатации продукта.</i>

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

*Матрица SWOT  
Альтернативы проведения НИ  
График проведения и бюджет НИ*

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Рагозин Дмитрий Валерьевич	к.и.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ72	Макаров Андрей Александрович		

#### **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Тема данной дипломной работы – исследование неупругих свойств никелида титана с субмикро- и наномасштабными поверхностными слоями, сформированными электронно-ионно-плазменными методами. Объектом исследования были образцы никелида титана с содержанием никеля 50,5 ат. %.

Цель работы – исследовать влияние ионно-электронно-плазменных воздействий на закономерности развития неупругой и пластической деформации никелида титана при разных схемах нагружения.

В результате исследования были изучены:

- закономерности развития неупругой деформации и её влияние пластической деформации на максимальный ресурс эффекта памяти формы в TiNi;
- морфология поверхности с помощью оптической микроскопии

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности исследования, оценка его эффективности, уровня возможных рисков. Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования;
- 2) Планирование научно-исследовательской работы;
- 3) Оценка материально-технической стоимости исследования;
- 4) Оценка ресурсоэффективности.

#### **4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

##### **4.1.1 Инициализация исследования и его технико-экономическое обоснование**

В настоящее время все большее развитие получает направление по созданию специальных медицинских сплавов титана. Это обосновывается возрастающими

требованиям к имплантатам. Сплавы титана не являются химически инертными материалами, их поверхность быстро покрывается оксидной пленкой, которая и обеспечивает им высокую антикоррозийную устойчивость. Однако сплавы на основе никелида титана ценятся не только за это качество, а ещё за свою способность возвращать исходную форму и способность работать в режиме многоциклового функционирования. Для этого требуется стабильность параметров мартенситного превращения в данном сплаве. Данная работа направлена на изучение влияния деформации на проявление эффекта памяти формы и исследование методов стабилизации его параметров.

#### **4.1.2 Потенциальные потребители результатов исследования**

В настоящее время в технике и медицине широко используются изделия из никелида титана. Это обуславливается его уникальными свойствами: способностью сохранять и возвращать заданную форму под воздействием температуры. Для достижения наиболее лучших результатов в этом направлении проводятся исследования на образцах данного материала. Надёжность функционирования изделий и рабочих элементов из сплавов на основе никелида титана определяется стабильностью воспроизводства таких параметров как последовательность и температуры мартенситных превращений, величины проявления ЭПФ и сверхэластичности, величина накопленной пластической деформации.

Исследование дипломной работы связано с изучением закономерностей проявления неупругих деформаций в зависимости от схем нагружения и температуры деформирования, а также способы стабилизации параметров мартенситного превращения и проявления эффекта памяти формы. Данное исследование не имеет коммерческого потенциала, поскольку проводится только в рамках научной исследовательской работы. Потенциальными потребителями данной работы могут быть предприятия, занимающиеся производством

медицинских имплантатов, стентов, крепежей протезов; пожарных сигнализаций и др.

### 4.1.3 SWOT – анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Данный анализ проводится в несколько этапов. Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде (таблица 1).

Таблица 1 – SWOT-анализ проекта

Сильные стороны	Возможности во внешней среде
<p>С1. Эффективные методы исследования материалов.</p> <p>С2. Методы оценки ресурса неупругой деформации материалов и способов стабилизации МП в данной работе являются экономичными и ресурсоэффективными;</p> <p>С3. Полученные данные имеют прикладной характер для улучшения методов стабилизации параметров мартенситных превращений;</p> <p>С4. Актуальность исследования.</p>	<p>В1. Простая адаптация научного исследования под иностранные языки;</p> <p>В2. Большой потенциал применения полученных данных как в России, так и в зарубежных странах.</p>
Слабые стороны	Угрозы внешней среды
<p>Сл1. Отсутствие современного и качественного оборудования для проведения испытания опытного образца;</p> <p>Сл2. Вероятность получения брака при эксперименте.</p>	<p>У1. Возможность создания более эффективного способа оценки методов стабилизации мартенситных превращений в TiNi;</p> <p>У2. Более качественное исследование в других научных центрах;</p>

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей

среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Таблица 2 – Сильные стороны проекта

Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	0	+	+
	B2	+	+	+	+

При анализе таблицы 2 были выявлены следующие коррелирующие сильные стороны и возможностей: B1C1C3C4 и B2C1C2C3C4.

Таблица 3 – Слабые стороны проекта

Возможности проекта		Сл1	Сл2
	B1	-	-
	B2	-	-

При анализе таблицы 3 коррелирующих слабых сторон и возможностей выявлено не было.

Таблица 4– Сильные стороны проекта

Угрозы		C1	C2	C3	C4
	У1	+	+	0	-
	У2	+	+	+	-

При анализе таблицы 4 были выявлены следующие коррелирующие сильные стороны и возможностей: У1С1С2, У2С1С2С3.

Таблица 5 – Слабые стороны проекта

Угрозы		Сл1	Сл2
	У1	-	-
	У2	-	-

При анализе таблицы 5 коррелирующих слабых сторон и угроз выявлено не было.

Был проведен комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Самой большой угрозой для проекта является более качественные исследования в других исследовательских центрах.

Среди слабых сторон – отсутствие современного и качественного оборудования для более точного проведения эксперимента.

## 4.2 Организация работ

### 4.2.1 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

Таблица 6 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя	Загрузка исполнителей
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	НК	НК – 100%
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	НК, И	НК – 80% И – 30%
	3	Выбор направления исследований	НК, И	НК – 30% И – 100%
	4	Календарное планирование работ по теме	НК, И	НК – 30% И – 100%
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Поиск и изучение литературы	И	И – 100%
	6	Составление литературного обзора	И	И – 100%
	7	Оценка правильности полученных результатов	НК	НК – 100%
	8	Исправление недочетов	И	И – 100%
	9	Деформирование образцов TiNi разными схемами нагружения	И.	И – 100%
Обобщение и оценка результатов	10	Обработка полученных результатов	И.	И – 100%
	11	Научное обоснование результатов и выводы	НК, И	НК – 50% И – 100%
Оформление отчета по НИР	12	Разработка плана по оформлению НТИ	И.	И – 100%
	13	Оформление отчета НТИ	И.	И – 100%
Защита отчета	14	Защита выпускной квалификационной работы	И.	НК – 60% И – 100%

В данном пункте составляется полный перечень проводимых работ, определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Наглядным результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Так как число исполнителей редко

превышает двух (степень распараллеливания всего комплекса работ незначительна) в большинстве случаев предпочтительным является линейный график. Для его построения хронологически упорядоченные вышеуказанные данные должны быть сведены в таблицу типа приведенной ниже.

Работу выполняли 2 человека: научный консультант (НК), инженер-дипломник (И).

#### 4.2.2 Продолжительность этапов работ

Расчет продолжительности этапов работ осуществлялся опытно-статистическим экспертным методом.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (8)$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ :

$$T_{p_i} = \frac{t_{ожі}}{\Psi_i}, \quad (9)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожi}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (10)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;  $T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;  $k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (11)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

В 2019 году коэффициент календарности равен:

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 118 - 14} = 1,56 \quad (12)$$

Расчёт трудозатрат на подбор и изучение материалов:

Определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ож}$ :

$$T_{ож} = \frac{3 \cdot 4 + 2 \cdot 5}{5} = 4,4;$$

Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ( $T_{РД}$ ), при  $K_{д} = 1,2$ :

$$T_{рд} = \frac{4,4 \cdot 1,2}{1} = 5,28;$$

Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ( $T_{рд}$ ) для научного руководителя, при  $K_d = 1,2$ :

$$T_{рд} = \frac{4,4 \cdot 1,2 \cdot 0,2}{1} = 1,05;$$

Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ( $T_{рд}$ ) для студента, при  $K_d = 1,2$ :

$$T_{рд} = \frac{4,4 \cdot 1,2 \cdot 1}{1} = 5,28;$$

Продолжительность выполнения этапа в календарных днях:

$$T_{кд} = 5,28 \cdot 1,56 = 8,24;$$

Продолжительность выполнения этапа в календарных днях ( $T_{кд}$ ) для научного руководителя:

$$T_{кд} = 5,28 \cdot 1,56 \cdot 0,2 = 1,64;$$

Продолжительность выполнения этапа в календарных днях ( $T_{кд}$ ) для студента:

$$T_{кд} = 5,28 \cdot 1,56 = 8,24.$$

Результаты расчетов приведены в таблице 7.

На основе таблицы 7 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основе таблицы 7 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования.

Таблица 7 – трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ож}$	НР	С	НР	С
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
1. Составление и утверждение технического задания	НР	1	3	1,8	2,16	–	3,37	–
2. Подбор и изучение материалов по теме	НР,С	4	5	4,4	1,05	5,28	1,64	8,24
3.Выбор направления исследований	НР	1	2	1,4	1,68	–	2,62	–
4.Календарное планирование работ по теме	НР,С	7	10	8,2	1,47	9,84	2,29	15,35
5.Поиск и изучение литературы	С	4	7	5,2	–	6,24	–	9,73
6.Составление литературного обзора	НР	1	2	1,4	1,68	–	2,62	–
7.Оценка правильности полученных результатов	С	1	2	1,4	–	1,68	–	2,62
8.Исправление недочетов	НР,С	5	6	4,8	2,88	3,46	4,49	5,4
9.Деформирование образцов TiNi разными схемами нагружения	НР, С	1	6	4,8	1,15	5,76	1,794	8,98
10.Обработка полученных результатов	НР, С	5	6	4,8	1,72	5,76	2,68	8,98
11.Научное обоснование результатов и выводы	НР, С	5	6	4,8	2,3	5,76	3,58	8,98
12.Разработка плана по оформлению НТИ	НР, С	10	11	10,4	9,98	12,48	15,56	19,46
13.Оформление отчета НТИ	С	10	11	10,4	–	12,48	–	19,46
14.Защита выпускной квалификационной работы	НР, С	6	7	7,8	0,93	9,36	1,45	14,6
<b>Итого:</b>		<b>61</b>	<b>84</b>	<b>71.6</b>	<b>27</b>	<b>78,1</b>	<b>42,09</b>	<b>121,8</b>

Таблица 7 – трудозатраты на выполнение проекта

Таблица 8 - Календарный план-график проведения НИОКР

Этап	НК	И	Февраль 2019			Март 2019			Апрель 2019			Май 2019		
			10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1	3,37	–	■											
2	1,63	8,23	■	■										
3	2,62	–		■										
4	2,29	15,35		■	■									
5	–	9,73				■	■							
6	2,62	–					■							
7	–	2,62					■							
8	4,49	5,4					■	■						
9	1,794	8,98						■	■					
10	2,68	8,98							■	■				
11	3,58	8,98								■	■			
12	15,56	19,46									■	■		
13	–	19,46										■	■	
14	1,45	14,6											■	■

НК – ■ И – ■

### 4.2.3 Расчет накопления готовности проекта

Цель данного пункта – оценка текущих состояний (результатов) работы над проектом. Величина накопления готовности работы показывает, на сколько процентов по окончании текущего (*i*-го) этапа выполнен общий объем работ по проекту в целом.

Введем обозначения:

- $TP_{\text{общ}}$  – общая трудоемкость проекта;
- $TP_i$  ( $TP_k$ ) – трудоемкость *i*-го (*k*-го) этапа проекта,  $i = \overline{1, I}$ ;
- $TP_i^H$  – накопленная трудоемкость *i*-го этапа проекта по его завершении;
- $TP_{ij}$  ( $TP_{kj}$ ) – трудоемкость работ, выполняемых *j*-м участником на *i*-м этапе, здесь  $j = \overline{1, m}$  – индекс исполнителя, в нашем примере  $m = 2$ .

Степень готовности определяется формулой:

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m TP_{km}}. \quad (5.5)$$

Таблица 9 - Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	$TP_i$ , %	$CG_i$ , %
Составление и утверждение технического задания	2,3	2,3
Подбор и изучение материалов по теме	3,5	5,8
Выбор направления исследований	12,2	18
Календарное планирование работ по теме	8,2	26,2
Подготовка образцов TiNi для исследования. Металлографический анализ образцов	12,3	38,5
Деформирование образцов TiNi разными схемами нагружения	13,3	51,8
Обработка полученных результатов	9,3	61,1
Научное обоснование результатов и выводы	13,2	74,3
Разработка плана по оформлению НИР	11,3	85,6
Оформление отчета НИР	14,4	86

### 4.3 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

#### 4.3.1 Расчет затрат на материалы

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{расхi}, \quad (13)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$\Pi_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Расчёт производим без учёта транспортных расходов.

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 10.

Таблица 10 - Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
Бумага наждачная водостойкая Р-800 SMIRDEXP800	шт	20	25 руб/шт	500
Бумага наждачная водостойкая Р-1000 SMIRDEXP1000	шт	20	30 руб/шт	600
Образцы TiNi	кг	5	20000 руб/кг	100000
Спирт этиловый ректификованный "Люкс" ГОСТ 5962-2013	мл	200	1200 руб/л	240
Вата мед.	г	200	400 руб/кг	80
<b>Итого:</b>				101420

#### 4.3.2 Расчет величины амортизационных отчислений

Для проведения исследования располагаем оборудованием, представленным в таблице 11.

Таблица 11 - Расчет величины амортизационных отчислений

№ оборудования	Тип оборудования	Требуемое количество	Стоимость, руб	Срок эксплуатации, лет	Срок использования в НТИ, кал.дни	Амортизационные отчисления, руб
1	Микроскоп Axiovert 200 MAT инвертированный металлографический	1	1 600 000	8	6	3287,7
<b>Итого</b>						3287,7

Амортизация рассчитывается по следующей формуле:

$$A_{\text{год}} = \frac{C}{T}, \quad (14)$$

Где  $C$  – стоимость оборудования;  $T$  – нормативный срок эксплуатации.

Амортизация за срок реализации проекта:

$$A_{\text{пр}} = \frac{A_{\text{год}}}{365} \cdot T_{ki}, \quad (15)$$

Где  $T_{ki}$  – продолжительность этапов использования оборудования.

Расчёт амортизации:

$$A_{\text{год}} = \frac{1\,600\,000}{8} = 200\,000 \text{ руб}$$

$$A_{\text{пр}} = \frac{200\,000}{365} \cdot 6 = 3287,7 \text{ руб}$$

#### 4.3.3 Расчет основной заработной платы

Для инженера 9-го разряда (студент - дипломник) месячный оклад составляет  $Z_{\text{от}}=9489$  руб/мес, для руководителя (профессора, дн, с ППС 4) -  $Z_{\text{бп}}=33664$  руб/мес.

Заработная плата работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (16)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{\text{осн}}$ ).

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (17)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (таблица 8);  $Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (18)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;  $F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 12).

Таблица 12– Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	252	252

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (19)$$

где  $Z_{\text{тс}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;  $k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{\text{тс}}$ );  $k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от  $Z_{\text{тс}}$ );  $k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 13.

Таблица 13– Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоёмкость, чел.-дн	Зарботная плата, приходящаяся на один чел.-дн., руб	Всего заработная плата по тарифу (окладам), руб
1	Составление и утверждение технического задания	Научный консультант	1	2889,8	2889,8
		Инженер 9-го разряда	1	763,6	763,6
2	Подбор и изучение материалов по теме	Научный консультант	2	2889,8	5779,6
		Инженер 9-го разряда	2	763,6	1527,2
3	Выбор направления исследований	Научный консультант	2	2889,8	5779,6
		Инженер 9-го разряда	2	763,6	1527,2
4	Календарное планирование работ по теме	Научный консультант	1	2889,8	2889,8
		Инженер 9-го разряда	1	763,6	763,6
5	Подготовка образцов TiNi для исследования. Металлографический анализ образцов	Инженер 9-го разряда	6	763,6	4581,6
6	Деформирование образцов TiNi	Научный консультант	8	2889,8	23118,4
		Инженер 9-го разряда	8	763,6	6108,8
7	Обработка полученных результатов	Инженер 9-го разряда	2	763,6	1527,2
8	Научное обоснование результатов и выводы	Научный консультант	1	2889,8	2889,8
		Инженер 9-го разряда	1	763,6	763,6
<b>Итого</b>					60 909,8

#### 4.3.4 Расчет бюджета затрат НИ

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 14.

Таблица 14– Бюджет затрат НИ

№ п/п	Наименование статьи	Сумма, руб.	Порядок расчета
1	Материальные затраты НИ	101420	Таблица 9
2	Амортизация оборудования	3 287,7	Таблица 10
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	60 909,8	Таблица 12
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	7 309,2	$60\,909,8 \cdot 12\% = 7\,309,2$
5	Отчисления на социальные нужды	20 602,1	$(60\,909,8 + 7\,309,2) \cdot 30,2\% = 20\,602,1$
6	Затраты на научные и производственные командировки	-	-
7	Контрагентские расходы	-	-
8	Прочие накладные расходы	15 444,6	$(п_1+п_2+п_3+п_4+п_5) \cdot 16\% = 15\,444,6$
<b>Бюджет затрат НИ</b>		<b>212 258,0 руб</b>	

#### 4.4 Оценка экономической эффективности проекта

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его

нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{212258,0}{212258,0} = 1$$

$$I_{\Phi}^{a1} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{300825}{212258,0} = 1,41$$

$$I_{\Phi}^{a2} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{250825}{212258,0} = 1,18$$

где  $I_{\Phi}^p$  - интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость i-го варианта исполнения;

$\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разы.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p,$$

Где  $I_m$  – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;  $a_i$  – весовой коэффициент i-го параметра;

$b_i^a$ ,  $b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;  $n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, пример которой приведен ниже.

Таблица 15 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Повышение производительности изделий	0,3	4	4	3
2. Материалоемкость	0,25	5	2	3
3. Надежность	0,1	5	5	4
4. Простота реализации	0,3	5	3	4
5. Помехоустойчивость	0,05	4	4	4
ИТОГО	1	23	18	18

$$I_m^p = 4 * 0,3 + 5 * 0,25 + 0,1 * 5 + 0,3 * 5 + 0,05 * 4 = 4,65$$

$$I_1^A = 4 * 0,3 + 2 * 0,25 + 0,1 * 5 + 0,3 * 3 + 0,05 * 4 = 3,3$$

$$I_2^A = 3 * 0,3 + 3 * 0,25 + 0,1 * 4 + 0,3 * 4 + 0,05 * 4 = 3,45$$

Интегральный показатель эффективности разработки ( $I_{финр}^p$ ) и аналога ( $I_{финр}^a$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p} = \frac{4,65}{0,77} = 6,04$$

$$I_{финр}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_{\phi}^{a1}} = \frac{3,3}{0,81} = 4,07$$

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^{a2}}{I_{\phi}^{a2}} = \frac{3,45}{1} = 3,45$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^{\text{р}}}{I_{\text{финр}}^{\text{а1}}} = \frac{6,04}{4,07} = 1,48$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^{\text{р}}}{I_{\text{финр}}^{\text{а2}}} = \frac{6,04}{3,45} = 1,75$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ср}}$  – сравнительная эффективность проекта;  $I_{\text{мэ}}^{\text{р}}$  – интегральный показатель разработки;  $I_{\text{мэ}}^{\text{а}}$  – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Таблица 16– Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,81	1	0,77
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,3	3,45	4,65
3	Интегральный показатель эффективности	4,07	3,45	6,041
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,48		1,75

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4БМ72	Макаров Андрей Александрович

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОМ</b>
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Материаловедение и технологии материалов

Тема ВКР:

<b>Исследование неупругих свойств никелида титана с субмикро- и наномасштабными поверхностными слоями, сформированными электронно-ионно-плазменными методами</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Работа посвящена исследованию неупругих свойств никелида титана с различными покрытиями методом кручения образцов. Никелид титана применяется во многих отраслях промышленности, широко используется в медицине (импланты, протезы, коронарные стенты и т.д.).</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Постановление Минтруда РФ и Минобразования РФ от 13 января 2003 г. N 1/29;</li> <li>– Статья 147 ТК РФ;</li> <li>– ГОСТ 12.2.033-78;</li> <li>– СН 181-7</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b>	<p><i>Были выявлены следующие опасные факторы производства:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Повышенный уровень шума</i></li> <li>2. <i>Недостаточная освещенность рабочего места</i></li> <li>3. <i>Неблагоприятные условия микроклимата</i></li> <li>4. <i>Возможность поражения током</i></li> <li>5. <i>Пожаровзрывоопасность</i></li> </ol>
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	<i>В работе применены малоотходные технологии, исключаящие попадание в</i>

	<i>атмосферу, гидросферу и литосферу вредных веществ.</i>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<i>В лаборатории ИФПМ СО РАН наиболее вероятно возникновение чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного характера. Аварии и катастрофы на объектах характеризуются внезапным обрушением зданий, сооружений, авариями на энергетических сетях (ТЭЦ, АЭС, ЛЭП и др.), авариями в коммунальном жизнеобеспечении, авариями на очистных сооружениях, технологических линиях и т. д.</i>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Исаева Елизавета Сергеевна			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ72	Макаров Андрей Александрович		

## **5 Социальная ответственность**

### **5.1 Введение**

Научно-исследовательская работа проводилась в лаборатории материаловедения сплавов с памятью формы ИФПМ СО РАН. Рабочей зоной являлась лаборатория площадью 15 м<sup>2</sup>, включающая в себя персональный компьютер, а также установку типа обратного крутильного маятника. Данная лаборатория являлась постоянным рабочим местом (ГОСТ 12.1.005 – 88) [43].

Научно-исследовательская работа заключалась в исследовании влияния поверхностной обработки на неупругие свойства никелида титана. Сплав никелида титана был куплен в ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ», а после нарезан на электроэрозионном станке "АРТА 151" в одной из лабораторий ИФПМ СО РАН. Черновые образцы проходили ручную шлифовку и полировку на шлифовальной бумаге. Исследования методом оптической металлографии проводили на микроскопе AXIOVERT 200 MAT. После анализа структуры образцы подвергались циклам «нагружение-разгрузка» на установке типа обратного крутильного маятника. При этом проводились необходимые расчёты степени деформации и были построены соответствующие графики.

### **5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Рабочее место – это часть помещения предприятия (организации), имеющая площадь и объем, достаточный для размещения работника и необходимого оборудования (рабочего стола, стула, контрольно-измерительных приборов, станков, а также справочных и рабочих материалов, инструментов, вычислительной техники и т.д.).

Рабочее место должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78 [44]:

а) рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество;

б) рабочий стул должен иметь дизайн, исключаящий онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте.

в) рабочее место должно соответствовать техническим требованиям и санитарным нормам;

г) конструкцией рабочего места должно быть обеспечено выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля.

В соответствии с указаниями по проектированию цветовой отделки помещений производственных зданий, согласно “Указаниям по проектированию цветовой отделки интерьеров производственных зданий промышленных предприятий” (СН-181-70 [45]), рекомендуются следующие цвета окраски помещений:

- потолок - белый или светлый цветной;
- стены - сплошные, светло-голубые;
- пол - темно-серый, темно-красный или коричневый.

Применение указанной палитры цветов обусловлено ее успокаивающим воздействием на психику человека, способствующим уменьшением зрительного утомления.

При выполнении интерьера, обычно выбирают не более трех основных цветов небольшой насыщенности. Окраска оборудования и приборов, в основном, имеет светлые цвета с высококонтрастными органами управления и надписями к ним.

Работа с компьютером без перерывов должна иметь продолжительность для взрослого пользователя не более 2 ч, ребенка – от 10

до 20 мин, в зависимости от возраста. В процессе работы желательно менять тип и содержание деятельности, например, чередовать редактирование и ввод данных и их считывание. Санитарными нормами предусматриваются обязательные перерывы в работе на ПЭВМ, во время которых рекомендуется делать простейшие упражнения для глаз, рук и опорно-двигательного аппарата. Рабочее место с ПЭВМ должно располагаться по отношению к оконным проемам так, чтобы свет падал сбоку, предпочтительнее слева. При наличии нескольких компьютеров расстояние между экраном одного монитора и задней стенкой другого должно быть не менее 2 м, а расстояние между боковыми стенками соседних мониторов – 1,2 м. Экран монитора должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии 60÷70 см, но не ближе 50 см

В течение рабочего дня (смены) работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается. Время предоставления перерыва и его конкретная продолжительность устанавливаются правилами внутреннего трудового распорядка или по соглашению между работником и работодателем. На работах, где по условиям производства (работы) предоставление перерыва для отдыха и питания невозможно, работодатель обязан обеспечить работнику возможность отдыха и приема пищи в рабочее время.

Все работники, в том числе руководители организаций, обязаны проходить обучение по охране труда и проверку знания требований охраны труда в порядке, установленном уполномоченным Правительством Российской Федерации федеральным органом исполнительной власти с учетом мнения Российской трехсторонней комиссии по регулированию социально-трудовых отношений. Все работники обязаны проходить инструктаж по охране труда, обучиться безопасным методам и приемам выполнения работ и оказания первой помощи пострадавшим.

### 5.3 Производственная безопасность

Работа в лаборатории связана с некоторыми вредными и опасными производственными факторами, подробное описание которых представлено далее. Вредные и опасные производственные факторы были определены из ГОСТ 12.0.003-2015 [46] (Опасные и вредные производственные факторы. Классификация).

Таблица 17 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разраб отка	Изгото вление	Эксплу атация	
1. Повышенный уровень шума	-	+	-	ГОСТ 12.1.003-83
2. Недостаточная освещенность рабочего места	+	+	-	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03
3. Неблагоприятные условия микроклимата	-	+	-	ГОСТ 12.1.005-88
4. Возможность поражения электрическим током	+	+	-	ГОСТ Р 12.1.019-2009 ГОСТ 12.2.007.0-75
5. Пожаровзрывоопасность	+	+	-	Приложение №3 к приказу ректора ТПУ №52/од от 21.06.2013

## 5.4 Анализ вредных производственных факторов

В условиях лаборатории ИФПМ СО РАН на производительность труда инженера-исследователя, находящегося на рабочем месте, влияют следующие вредные производственные факторы (О и В ПФ ГОСТ 12.0.003-74 [53]):

1. Повышенный уровень шума;
2. Недостаточная освещенность рабочего места;
3. Неблагоприятные условия микроклимата.

### *Повышенный уровень шума*

Шум - это беспорядочное сочетание различных по частоте и силе звуков, мешающих человеческой деятельности и вызывающие неприятные ощущения.

Повышенный уровень шума увеличивает риск ухудшения слуха, повышается вероятность развития гипертонической болезни сердца, коронардиосклероза, стенокардии, инфаркта миокарда, а также шум является одной из основных причин изменений сосудов головного мозга. В данной работе источником шума является работающая шаровая мельница.

В таблице 18 представлены нормативные значения уровней шума на рабочих местах согласно ГОСТу 12.1.003-83 [47] (высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, измерительные и аналитические работы в лаборатории).

Для защиты от шума применяют коллективные средства защиты и индивидуальные. В данном случае наиболее подходящими являются средства индивидуальной защиты, к которым относятся противорумовые вкладыши (беруши), наушники.

Таблица 18 Нормативные значения уровней шума на рабочих местах  
(ГОСТ 12.1.003-83 с изм. 1999 г.)

Рабочие места	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Помещения лабораторий для проведения экспериментов	93	79	70	63	58	55	52	50	49	60

### *Недостаточная освещенность рабочего места*

Недостаточная освещенность рабочего места – одно из важнейших технических требований к рабочему месту инженера. Освещенность значительно влияет на эффективность трудового процесса. Недостаточная освещенность способствует возрастанию нагрузки на органы зрения и приводит к утомляемости всего организма. Поэтому необходимо обеспечить оптимальное сочетание общего и местного освещения. Естественное освещение должно удовлетворять СНиП II-4-79 [55]. Нормы естественного освещения установлены с учетом обязательной регулярной очистки стекол световых проемов не реже двух раз в год (для помещений с незначительным выделением пыли, дыма и копоти). Учитывая, что солнечный свет оказывает благоприятное воздействие на организм человека, необходимо максимально продолжительно использовать естественное освещение.

Искусственное освещение в помещениях должно осуществляться системой общего равномерного освещения. В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы комбинированного

освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов). В лаборатории для работы над дипломным проектом используется комбинированный вид освещения.

В соответствии с характером выполняемых работ, освещенность рабочего места по СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 [55] должна быть 400 Лк – общая освещенность и 500 лк — комбинированное освещение.

### *Неблагоприятные условия микроклимата*

Основными факторами, характеризующими микроклимат производственной среды, являются: температура, подвижность и влажность воздуха.

Высокая температура воздуха способствует быстрой утомляемости работающего, может привести к перегреву организма, тепловому удару. Низкая температура воздуха может вызвать местное или общее охлаждение организма, стать причиной простудного заболевания либо обморожения.

Высокая относительная влажность при высокой температуре воздуха способствует перегреванию организма, при низкой же температуре увеличивается теплоотдача с поверхности кожи, что ведет к переохлаждению. Низкая влажность вызывает неприятные ощущения в виде сухости слизистых оболочек дыхательных путей работающего.

При нормировании метеорологических условий в производственных помещениях учитывают время года, физическую тяжесть выполняемых работ, а также количество избыточного тепла в помещении. Оптимальные и допустимые метеорологические условия температуры и влажности устанавливаются согласно ГОСТ 12.1.005-88 [49] (Таблица 19).

Для поддержания нормальных параметров микроклимата в рабочей зоне применяются следующие мероприятия: устройство систем вентиляции, кондиционирование воздуха и отопление.

Таблица 19 – Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны

с	Температура воздуха, °С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
	Оптим.	Допуст.	Оптим.	Допуст.	Оптим.	Допуст.
Холодный	17-19	15-21	40-60	75	0,2	0,4
Теплый	20-22	16-27	40-60	70	0,3	0,2-0,5

В соответствии с СН-245-71 [56] в помещении должен быть организован воздухообмен. Это осуществляется с помощью вентиляции.

Для улучшения воздухообмена в помещении необходимо выполнить следующие технические и санитарно-гигиенические требования:

1. Общий объем притока воздуха в помещении должен соответствовать объему вытяжки;
2. Правильное размещение приточной и вытяжной вентиляции,

Согласно СН-245-71 объем производственных помещений должен быть таким, чтобы на одного работающего приходилось не менее 15 м<sup>3</sup> свободного пространства и не менее 6 м<sup>2</sup> площади. Следовательно, согласно СП 2.2.1.1312–03 [57] при наличии естественной вентиляции следует проектировать подачу наружного воздуха в количестве не менее 30 м<sup>3</sup>/ч на каждого работающего.

## 5.5 Анализ опасных производственных факторов

Согласно ГОСТ 12.0.003-74 [53] инженер-исследователь при работе в лаборатории материаловедения сплавов с памятью формы ИФПМ СО РАН может быть подвергнут действию следующих опасных факторов:

- опасность поражения электрическим током, поскольку работать приходится с оборудованием, питающимся от сети ~220 В 50 Гц;
- возникновение пожаров в результате короткого замыкания.

### *Возможность поражения электрическим током*

Основными причинами воздействия тока на человека являются:

1. Случайное прикосновение или приближение на опасное расстояние к токоведущим частям;
2. Появление напряжения на металлических частях оборудования в результате повреждения изоляции или ошибочных действий персонала;
3. Шаговое напряжение на поверхности земли в результате замыкания провода на землю;
4. Появление напряжения на отключенных токоведущих частях, на которых работают люди, вследствие ошибочного включения установки;
5. Освобождение другого человека, находящегося под напряжением;
6. Воздействие атмосферного электричества, грозových разрядов.

Согласно ГОСТ 12.1.038-82 [58] предельно допустимые уровни напряжения прикосновения и токов, воздействию которых человек может подвергаться в процессе работы с электрооборудованием, составляют для установок в нормативном режиме: для постоянного тока – не более 0,8 В и 1 мА соответственно, для переменного тока (частота 50 Гц) - не более 2,0 В и 0,3 мА соответственно.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ или другими электрическими приборами и установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Характер и последствия поражения зависят от величины, частоты и пути прохождения тока; продолжительности воздействия.

С точки зрения электробезопасности (ГОСТ 12.1.030-81) [59], оборудование, запитываемое напряжением выше 42В, должно иметь заземление или зануление. Светильники общего освещения, присоединенные к источнику питания (электросети) напряжением 127 и 220 В, должны устанавливаться на высоте не менее 2,5 м от уровня земли, пола, настила. При высоте подвеса менее 2,5 м светильники должны подсоединяться к сети напряжением не выше 42 В. Кроме того, обязательно должна быть предусмотрена возможность быстрого отключения напряжения с разделительного щита.

Электрозащитные средства –это переносимые и перевозимые изделия, служащие для защиты людей, работающих с электроустановками, от поражения электрическим током, от воздействия электрической дуги. Эти средства должны обеспечивать высокую степень защиты и удобство при эксплуатации. Их выбирают с учетом требований безопасности для данного вида работ. В первую очередь безопасность обеспечивается применением средств коллективной защиты, а затем, если она не может быть обеспечена, применяют средства индивидуальной защиты.

К средствам индивидуальной защиты от поражения электрическим током относятся:

– оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть заблокированы с устройствами, отключающими рабочее напряжение при снятии;

– изолирующие устройства и покрытия;

– устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения;

– устройства дистанционного управления; –предохранительные устройства и др.

Для обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала необходимо предусмотреть:

–защитное заземление всех металлических нетоковедущих частей электрооборудования  $R_3 \leq 4 \text{ Ом}$ ;

– раздельное размещение аппаратуры с напряжением до 1000 В и свыше 1000 В;

–ограждение электронного источника, исключающее возможность прикосновения к токоведущим частям;

–полное ограждение от прикосновения к аппаратуре с напряжением выше 1000 В;

–отключение всех источников питания установки общим рубильником.

### *Пожаровзрывоопасность*

Пожаровзрывобезопасность технологических процессов и оборудования, должна соответствовать требованиям настоящего стандарта ГОСТ 12.1.010—76 [60], ГОСТ 12.1.004-91 [61] и федеральному закону от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ [62].

Производственные процессы должны разрабатываться так, чтобы вероятность возникновения взрыва на любом взрывоопасном участке в течение года не превышала  $10^{-6}$ .

Системы пожарной безопасности должны характеризоваться уровнем обеспечения пожарной безопасности людей и материальных ценностей, а также экономическими критериями эффективности этих систем для материальных ценностей, с учетом всех стадий (научная разработка, проектирование, строительство, эксплуатация) жизненного цикла объектов и выполнять одну из следующих задач:

- исключать возникновение пожара;
- обеспечивать пожарную безопасность людей;
- обеспечивать пожарную безопасность материальных ценностей;
- обеспечивать пожарную безопасность людей и материальных ценностей одновременно.

Противопожарная защита должна достигаться применением одного из следующих способов или их комбинацией:

- применением средств пожаротушения и соответствующих видов пожарной техники;
- применением автоматических установок пожарной сигнализации и пожаротушения;
- применением основных строительных конструкций и материалов, в том числе используемых для облицовок конструкций, с нормированными показателями пожарной опасности;
- применением пропитки конструкций объектов антипиренами и нанесением на их поверхности огнезащитных красок (составов);
- устройствами, обеспечивающими ограничение распространения пожара;
- организацией с помощью технических средств, включая автоматические, своевременного оповещения и эвакуации людей;

- применением средств коллективной и индивидуальной защиты людей от опасных факторов пожара;

- применением средств противодымной защиты.

Пожарная безопасность и взрывобезопасность оборудования и технологических процессов при наличии в них горючих пылей достигается:

- исключением образования внутри аппаратов и оборудования горючей среды;

- исполнением, применением и режимом эксплуатации аппаратов и оборудования;

- обеспечением не более допустимых величин: температуры и количества горючей пыли, концентрации кислорода или другого окислителя в пылегазовой смеси;

- обеспечением необходимой концентрации флегматизатора в воздухе;

- применением устройств аварийного сброса давления;

- применением оборудования, рассчитанного на давление взрыва;

Достаточность выбранных мер должна быть подтверждена испытаниями по ГОСТ 12.1.004—76 [63] и ГОСТ 12.1.010—76 [60].

## **5.6 Экологическая безопасность**

Охрана окружающей среды представляет собой комплекс мер, направленный на ограничение негативного воздействия человеческой деятельности на природу

Основным материалом, используемым в работе, является никелид титана. Никелид титана биоинертен и не оказывает токсического воздействия на флору и фауну. Также в работе применены малоотходные технологии, исключаящие попадание в атмосферу, гидросферу и литосферу вредных веществ.

Лаборатория является не производственной, а значит отсутствует производственный мусор (в том числе и пожароопасный, и вредный для окружающей среды). Тем не менее могут быть приняты следующие меры по сохранению окружающей среды: сортировка мусора и последующая утилизация. К таким видам мусора относятся: отходы, содержащие гальванические элементы (например, батарейки), макулатура (черновики, отработанная бумага и т.п.), отработанных картриджей от принтеров, опасных отходов отработанных люминесцентных ламп

### **5.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

В лаборатории материаловедения сплавов с памятью формы ИФПМ СО РАН наиболее вероятно возникновение чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного характера. Аварии и катастрофы на объектах характеризуются внезапным обрушением зданий, сооружений, авариями на энергетических сетях (ТЭЦ, АЭС, ЛЭП и др.), авариями в коммунальном жизнеобеспечении, авариями на очистных сооружениях, технологических линиях и т. д.

Одной из важнейших частей комплекса защитных мероприятий на рабочем месте является мероприятия, направленные на обеспечение противопожарной безопасности. Используемый технологический процесс в условиях лаборатории материаловедения сплавов с памятью формы согласно СНиП 2.01.02-85\* [64] относится к категории Д, так как использует негорючие вещества в холодном состоянии. В данном случае источником возгорания может оказаться неисправность и неправильная эксплуатация электроустановок.

Во время исследования, человек работает с ПЭВМ. Наиболее вероятная ЧС, которая может возникнуть при работе с ПЭВМ – пожар, так как в современных ЭВМ очень высокая плотность размещения элементов электронных схем, в непосредственной близости друг от друга

располагаются соединительные провода и кабели, при протекании по ним электрического тока выделяется значительное количество теплоты, при этом возможно оплавление изоляции и возникновение возгорания. Возникновение других видов ЧС – маловероятно.

Существует 5 степеней огнестойкости зданий, сооружений. Помещение лаборатории можно отнести к первой степени огнестойкости.

Предусмотренные средства пожаротушения (согласно требованиям противопожарной безопасности СНиП 2.01.02-85): огнетушитель ручной углекислотный ОУ-5, пожарный кран с рукавом и ящик с песком (в коридоре). Кроме того, каждое помещение оборудовано системой противопожарной сигнализации.

При пожаре весь персонал необходимо эвакуировать в самый краткий срок. В помещении должен располагаться план эвакуации. Для тушения в здании должны находиться углекислотные и порошковые огнетушители, воду можно использовать только во вспомогательных обесточенных помещениях. Помещение должно быть оборудовано пожарными извещателями, которые позволят оповестить дежурный персонал о пожаре, а также оповестят службу пожарной охраны. Необходимость обеспечения мер безопасности обусловлено необходимостью обеспечения безопасности рабочего персонала.

Полное или частичное внезапное обрушение здания – это чрезвычайная ситуация, возникающая по причине ошибок, допущенных при проектировании здания, отступлении от проекта при ведении строительных работ, нарушении правил монтажа, при вводе в эксплуатацию здания или отдельных его частей с крупными недоделками, при нарушении правил эксплуатации здания, а также вследствие природной или техногенной чрезвычайной ситуации.

При обнаружении, что здание теряет устойчивость необходимо незамедлительно покинуть здание. Спускаться по зданию необходимо по

лестнице, а не на лифте. Оказавшись на улице следует отойти на безопасное расстояние от здания, желательно перейти на открытое пространство. При отсутствии возможности покинуть здание, следует занять наиболее безопасное место –дверные проёмы, балки каркаса, углы. Необходимо обезопасить себя от падения обломков, накрывшись крепкими вещами, такими как чугунные ванны или столы с прочными ножками. Рекомендуется отключить воду, электричество и газ. Заранее обеспечить пути ухода, открыв двери и окна, после открытия окон от них следует отойти, чтобы если они разобьются не зацепило осколками. Двигаться в полуразрушенном здании крайне опасно, поэтому следует ожидать помощи и привлекать к себе внимание криками.

Основными мероприятиями, обеспечивающими успешную эвакуацию людей и имущества из горящего здания, являются:

- составление планов эвакуации;
- назначение лица, ответственного за эвакуацию, которое должно следить за исправностью дверных проемов, окон, проходов и лестниц;
- ознакомление работающих в лаборатории сотрудников с планом эвакуации, который должен висеть на видном месте.

В ИФПМ СО РАН ведет работу штаб по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям (ГО и ЧС). Штаб ГО и ЧС является постоянно действующим органом управления в объектовом звене предупреждения и ликвидации ЧС и ГО. Он специально уполномочен решать задачи гражданской обороны, задачи по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и их последствий в институте.

## 5.8 Выводы по разделу

Таким образом, в данном разделе были рассмотрены негативные факторы, влияющие на работника в процессе выполнения настоящей выпускной квалификационной работы, а также меры по снижению их вредного/опасного действия к минимуму, рассмотрены чрезвычайные ситуации и поведение в них.

Из всего вышеперечисленного можно сделать выводы:

- разработанные материалы и изделия из никелида титана должны быть безопасными в использовании, надёжными и не должны быть источникам ЧС.

- для обеспечения безопасности жизнедеятельности при работе в лаборатории обязательно выполнять все действия по правилам и технике безопасности.

## 6 Список опубликованных работ студента

1. Макаров А.А. Исследование реактивных напряжений в сплаве  $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$  с покрытиями субмикронной толщины из молибдена и тантала // Инновационное развитие современной науки: проблемы, закономерности, перспективы: сборник статей IV Международной научно-практической конференции. В 2 ч. Ч. 1. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2017. – 242 с.
2. Нейман А.А., Тересов А.В., Яковлев Е.В., Семин В.О., Макаров А.А., Мейснер Л.Л. Структура поверхностных слоев никелида титана после электронно-пучковых воздействий // Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций: сборник тезисов докладов международной конференции, Томск, 9-13 Октября 2017. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2017.

## 7 Заключение

В работе проводились исследования модификации поверхности образцов из никелида титана с помощью методов обработки низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками (НСЭП), ионной имплантации и магнетронного осаждения. Проведены испытания кручением на установке типа обратного крутильного маятника для оценки неупругих свойств никелида титана с вышеперечисленными модификациями поверхности. Проанализированы изображения поверхности образцов, полученные с помощью оптической микроскопии

Представлены диаграммы накопления и возврата деформации, соответственно, с увеличением нагрузки и при разгрузке образцов сплава  $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$  с исходной и с модифицированной поверхностью. Построены кривые развиваемых реактивных напряжений при нагреве в образцах  $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$  с различными поверхностными модификациями и без, а также после испытаний на сверхэластичность.

Сделаны следующие выводы:

1. Модификация поверхности электронным пучком с плотностью энергии  $W=10$  Дж/см<sup>2</sup> характеризуется повышением значений напряжений мартенситного сдвига (на 20–30% выше) по сравнению с образцами без обработок.

2. При ионной имплантации поверхности образцов никелида титана отсутствует прямая закономерность между порядковым номером (атомным весом) имплантируемого иона и величиной усилий, возникающих в образце при внешнем деформирующем воздействии.

3. При магнетронном осаждении покрытий молибдена и тантала на поверхность сплава  $TiNi$  при всех температурах испытаний значительно снижаются напряжения прямых мартенситных сдвигов (на ~40–50%). Причем осаждение молибдена снижает напряжения несколько больше, чем осаждение тантала.

4. Покрытия из молибдена повышают величины развиваемых реактивных напряжений в образцах TiNi, причем влияние покрытия тем значительнее, чем больше его толщина (+6% для 200 нм и +18% для 400 нм толщины покрытия). Образцы же с покрытиями из тантала толщиной 200 нм и 400 нм развивают при тех же условиях реактивные напряжения ниже на 3% и на 14% по сравнению с образцами без покрытий.

5. В 4 главе оценен коммерческий потенциал исследований, рассмотрены потенциальные потребители результатов исследования, рассчитан бюджет затрат на научно-исследовательскую работу, оценена экономическая эффективность проекта.

5. В 5 главе описаны правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, проанализированы вредные и опасные производственные факторы, а также меры предосторожности. Показан порядок действий в чрезвычайных ситуациях.

## 8 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курдюмов Г.В. Явления закалки и отпуска – М.: Металлургиздат, 1960. –64 с.
2. Лихачёв В.А. Эффект памяти формы/СОЖ Физика металлов. 1997 №3, С. 107-112.
3. Курдюмов Г.В. Превращения в железе и стали– М.: Наука, 1977. – 238 с
4. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. – Ленинград: Изд-во Ленингр. Ун-та, 1987. – 216 с.
5. Хачин В.Н., Пушин В.Г., Кондратьев В.В. Никелид титана: структура и свойства. – М.: Наука, 1992. – 160 с.
6. Васин А.Е.Токсичность некоторых тяжелых металлов для инфузорий рода *paramecium*. Вестник Самарского университета. Естественная серия. 2007. № 8 (58). С. 286-293.
7. Нейман А.А. Закономерности изменения неупругих свойств сплава  $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$  после магнетронного осаждения и ионной модификации покрытий из молибдена и тантала на его поверхности дис. канд. тех. наук / А.А. Нейман– Томск, 2010. – 153 с.
8. Остропико Е. С. Исследование функциональности рабочих элементов с памятью формы: диссертация кандидата Физико-математических наук: 01.02.04 / Остропико Евгений Сергеевич; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»], 2018.
9. Мейснер Л. Л., Никонова И. В., Раздорский В. В., Котенко М. В., Коррозионная стойкость и биосовместимость никелида титана с обогащенными Титаном наноразмерными поверхностными слоями,

сформированными ионно- и электронно-лучевыми методами // «Перспективные материалы». – 2009. №2. – С. 32–44.

10. Дударев Е.Ф. Микропластическая деформация и предел текучести поликристаллов. - Томск: Изд-во Томского университета, 1988. - 256 с.

11. Панин В.Е., Фомин В.М., Титов В.М. физические принципы мезомеханики поверхностных слоев и внутренних границ раздела в деформируемом твердом теле // Физическая мезомеханика. 2003. Т.6, №2. – С. 5–15.

12. Бойко В.И., Евстигнеев В.В. Введение в физику взаимодействия сильноточных пучков заряженных частиц с веществом. М.: Энергоатомиздат. – 1988. – 136 с.

13. Мейснер Л.Л., Миронов Ю.П., Озур Г.Е., Марков А.Б., Яковлев Е.В. Структура, текстурные эффекты и упруго-напряженные состояния поверхностного слоя сплава TiNi, сформированного путем обработки микросекундным низкоэнергетическим электронным пучком // VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва. 7-10 ноября 2017 г./ Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2017, 951с.

14. Нейман А.А., Мейснер Л.Л., Макаров А.А. Изменение неупругих свойств никелида титана с электронно-пучковой модификацией поверхности в результате термообработок // Тезисы докладов Международных конференций "Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций" и "Химия нефти и газа" в рамках Международного симпозиума "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций" . 2018. С. 454-455

15. Мейснер Л. Л., Гирякова Ю. Л., Лотков А. И., Литовченко Н.А. Исследование упругопластических характеристик сплава  $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$

модифицированного облучением, методом динамического наноиндентирования // Физич. Мезомех. Спец. Вып. Ч1. 2004. С. 272-274.

16. Wu X., Fu Y., Han Y., Hua W., Yang S. A study of TiNi shape-memory alloy modified by pulsed high-energy density plasma // Materials Science Forum. V. 394–395. – 2002. – P. 149–152.

17. Surface modification of ni (50.6 at. %) ti by high current pulsed electron beam treatment//Zhang K.M., Zou J.X., Yang D.Z., Hao S.Z., Dong C., Grosdidier T., Gey N. Journal of Alloys and Compounds. 2007. Т. 434-435. № SPEC. ISS. p. 682-685.

18. Improved in vitro corrosion resistance of a niti alloy by high current pulsed electron beam treatment//Zhang K.M., Yang D.Z., Zou J.X., Dong C., Grosdidier T. Surface and Coatings Technology. 2006. Т. 201. № 6. p. 3096-3102.

19. Ионная имплантация в полупроводники и другие материалы. Сб. ст., пер. с англ., под ред. В.С.Вавилова. – М.: Мир, 1980. – 331 с.

20. Аброян И. А., Андронов А. Н., Титов А. И., Физические основы электронной и ионной технологии, М.: Высшая школа, 1984. – 320 с.

21. Матюхин С.И. Ионная имплантация как метод внедрения атомных частиц в углеродные наноструктуры // Тез. докл. Междунар. конф. «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии. – Кисловодск, Россия, 2002. – 77 с.

22. Tan L., Crone W.C. Surface characterization of NiTi modified by plasma source ion implantation // Acta Materialia. №50. – 2002. – P. 4449–4460.

23. Zhao X.K., Cai W., Tian Y., Zhao L. Microstructure and hemocompatibility of a phosphorus ion-implanted TiNi shape-memory alloy // Materials Science Forum. V.394–395. – 2002. – P. 153–156.

24. Asaoka T., Nakazawa S. Effect of calcium ion implantation and of immersion in Hank's solution on shape memory properties of TiNi alloy // J. de Physique IV. –2003. – P. 1121–1124.

25. Мейснер Л.Л., Сивоха В.П., Шаркеев Ю.П., Кульков С.Н., Гриценко Б.П. Пластическая деформация и разрушение ионно–модифицированного сплава  $\text{Ni}_{50}\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{10}$  с эффектом памяти формы на мезо– и микроуровнях // Журнал технической физики. Т.70. №1. – 2000. – С. 32–36.

26. Meisner L.L., Sivokha V.P., Lotkov A.I., Barmina E.G. Effect of the ion implantation on shape memory characteristics of TiNi alloy // J. de Physique IV. V.112. – 2002. – P. 663–666.

27. Мейснер Л.Л., Сивоха В.П., Лотков А.И., Бармина Е.Г., Гирякова Ю.Л. Пластические свойства сплавов TiNi с тонкими поверхностными слоями, модифицированными облучением // Материаловедение. №4. – 2003. – С. 43–47.

28. Лотков А.И., Мейснер Л.Л., Гришков В.Н. Сплавы на основе никелида титана: ионно–лучевая, плазменная и химическая модификации поверхности // Физика металлов и металловедение. Т.99. №5. – 2005. – С. 66–78.

29. Meisner L.L., Sivokha V.P., Lotkov A.I., Derevyagina L.A. Surface morphology and plastic deformation of the ion–implanted TiNi alloy // Physica. B307. – 2001. – P. 251–257.

30. Мейснер Л.Л. Механические и физико-химические свойства сплавов на основе никелида титана с тонкими поверхностными слоями, модифицированными потоками заряженных частиц. Физическая мезомеханика 7, Спец. Выпуск, Ч.2. – 2004. 169-172 с.

31. Зайков В.А., Бурмаков А. П., Кулешов В. Н., Управляемое магнетронное осаждение пленок оксида индия – олова ITO с оптимальными свойствами//БелГУ, –2009, 58 с.

32. Васильев И. И., Абдуллин И. Ш., Миронов М. М., Взаимодействие плазмы с поверхностью металлических изделий // КНИТУ. – 2013. – 73 с.

33. Юрченко Г.В., Электрические и оптические свойства пленок ИТО, полученных методом магнетронного распыления // ВАНТ. – 2000. – №5. – С. 97-98.

34. Гришков В.Н., Лотков А.И., Тимкин В.Н. Структурные превращения и эволюция мезоструктуры при деформировании гетерогенно–слоевых сплавов на основе TiNi // Физическая мезомеханика. Т.7. № S2. – 2004. – С. 131–134.

35. Kim K.S., Jee K.K., Kim Y.B., Jang W.Y., Han S.H. Effect of oxidation on transformation and deformation behavior in Ni–Ti alloy // Eur. Phys. J. Special Topics. №158. – 2008. – P. 67–71.

36. Steegmueller R., Wagner C., Fleckenstein T., Schuessler A. Gold coating of nitinol devices for medical applications // Materials Science Forum. V. 394–395. – 2002. – P. 161–164.

37. Lee S.L., Doxbeck M., Mueller J., Cipollo M., Cote P. Texture, structure and phase transformation in sputter beta tantalum coating // Surface and Coatings Technology. 2004. P. 44-51

38. Мейснер Л.Л., Лотков А.И., Гудимова Е.Ю., Остапенко М.Г., Структурно-фазовые состояния поверхностных слоев никелида титана и покрытий из тантала, полученных магнетронными способами осаждения // Вестник ТГУ. Т. 18. №4. –2013. –С. 1827-1828

39. Heßing C., Frenzel J., Pohl M., Shabalovskaya S. Effect of martensitic transformation on the performance of coated NiTi surfaces // Materials Science and Engineering. V. A486. – 2008. P. 461–469.

40. Гудимова Е.Ю., Шабалина О.И., Нейман А.А., Бощенко А.А., Баев А.Е., Винтизенко С.И., Мейснер Л.Л. Исследование морфологии, элементного состава и рентгеноконтрастности TiNi сплава с Ti-Ta

покрытием // Международная конференция "Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций" и "Химия нефти и газа" в рамках Международного симпозиума "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций" . 2018. С. 405-406.

41. Егорова О.В. С микроскопом на «ты». – Санкт-Петербург: Интермедика, – 2000. –326 с.

42. Мейснер Л. Л., Лотков А. И., Нейман А. А., Арышева Г. В. Влияние ионной модификации на закономерности неупругого поведения в композиционных материалах из никелида титана с покрытиями из молибдена и тантала // Перспективные материалы Специальный выпуск (13) октябрь 2011 С. 572-581

43. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1). [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_136698/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_136698/) (режим доступа: свободный).

44. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Техэксперт". URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003913> (режим доступа: свободный).

45. СН 181-70 Указания по проектированию цветовой отделки интерьеров производственных зданий промышленных предприятий. [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Техэксперт" URL: <http://docs.cntd.ru/document/901707762> (режим доступа: свободный).

46. ГОСТ 12.0.003-2015. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные

факторы. Классификация (введен в действие Приказом Росстандарта от 09.06.2016 N 602-ст) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=STR;n=20151#0> (режим доступа: ограниченный).

47. ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением N 1). [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Техэксперт". URL: <http://docs.cntd.ru/document/5200291> (режим доступа: свободный).

48. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. 2.2.1/2.1.1. Проектирование, строительство, реконструкция и эксплуатация предприятий, планировка и застройка населенных пунктов. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. Санитарные правила и нормы (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 06.04.2003) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_41996/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41996/) (режим доступа: свободный).

49. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1). [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Техэксперт". URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003608> (режим доступа: свободный).

50. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Техэксперт". URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200080203> (режим доступа: свободный).

51. ГОСТ 12.2.007.0-75. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности (введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 10.09.1975 N 2368) (ред. от 01.06.1988) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=STR;n=7996#0> (режим доступа: ограниченный).

52. Инструкция о мерах пожарной безопасности (Приложение №3 к приказу ректора ТПУ №52/од от 21.06.2013) [Электронный ресурс]: Корпоративный портал ТПУ. URL: <http://portal.tpu.ru/departments/head/education/document> (режим доступа: свободный).

53. ГОСТ 12.0.003-74 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (с Изменением N 1). [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Техэксперт". URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003608> (режим доступа: свободный).

54. СНиП II-4-79 Естественное и искусственное освещение [Электронный ресурс]: Сайт Докипедия. URL: <https://dikipedia.ru/document/5067535> (режим доступа: свободный).

55. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. 2.2.1/2.1.1. Проектирование, строительство, реконструкция и эксплуатация предприятий, планировка и застройка населенных пунктов. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. Санитарные правила и нормы (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 06.04.2003) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_41996/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41996/) (режим доступа: свободный).

56. СН 245-71 Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий. [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Техэксперт". URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200080203> (режим доступа: свободный).

57. СП 2.2.1.1312-03 Гигиенические требования к проектированию вновь строящихся и реконструируемых промышленных предприятий. [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Техэксперт". URL: <http://docs.cntd.ru/document/901862522> (режим доступа: свободный).

58. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1). [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Техэксперт". URL: <http://docs.cntd.ru/document/5200313> (режим доступа: свободный).

59. ГОСТ 12.1.030-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление (с Изменением N 1). [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Техэксперт". URL: <http://docs.cntd.ru/document/5200289> (режим доступа: свободный).

60. ГОСТ 12.1.010-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Взрывобезопасность. Общие требования (с Изменением N 1). [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Техэксперт". URL: <http://docs.cntd.ru/document/5200270> (режим доступа: свободный).

61. ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменением N 1). [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Техэксперт". URL: <http://docs.cntd.ru/document/9051953> (режим доступа: свободный).

62. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (с изменениями на 29 июля 2017 года) (редакция, действующая с 31

июля 2018 года) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Техэксперт". URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (режим доступа: свободный).

63. ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменением N 1). [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Техэксперт". URL: <http://docs.cntd.ru/document/9051953> (режим доступа: свободный).

64. СНиП 2.01.02-85\* Противопожарные нормы. [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Техэксперт". URL: <http://docs.cntd.ru/document/871001017> (режим доступа: свободный).

**Приложение I**  
(справочное)

**Study of the inelastic properties of titanium nickelide with surface layers  
formed by electron-ion-plasma methods**

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ72	Макаров Андрей Александрович		

Консультант школы отделения ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Квашнина Ольга Сергеевна			

Консультант – лингвист отделения ИШНПТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения материаловедения	Лямина Галина Владимировна	к.х.н.		

## **Martensitic transformation**

Martensitic transformation (MT) is the one of the main types of phase transformations in the solid state. They occur in many metal alloys, intermetallic and metal-ceramic compounds [1]. The key structural features of all MTs are:

- the mechanism of structural rearrangement of atom displacements while maintaining their proximity;

- ordered and oriented nature of such displacements during the transformation of the austenitic phase crystalline structure into the martensitic phase one. Important consequences of this is a notable macroscopic shift and, for example, appearance of a surface pattern on a pre-polished surface [2]. G.V. Kurdjumov noted the following important feature of the martensitic transformation, based on the generalization of many experimental facts: “Martensitic transformation is a regular rearrangement of the lattice. The atoms do not exchange places, but only shift relative to each other at distances not exceeding the interatomic ones”.

This definition distinguishes MT from other phase transformations. The diffusionless rearrangement shear mechanism determines the unique regular patterns of the MT, crystal-geometric relations, and size-orientation relationship between the atomic-crystalline lattices of the austenitic and martensitic phases, their structural-morphological features, such as the shape of martensite crystals, their boundaries and with the austenitic phase (or habit planes), as well as the internal structure of the phases.

MT's physical reason is the increase in instability of the austenite crystal lattice, due to the possibility of changing the symmetry and parameters of the original lattice, which ensure a decrease in the free energy of the system [1].

Thermodynamic analysis of MTs is based on study of the temperature relationships of the initial austenitic and final martensitic phases' free

energies and their difference  $\Delta F$ . The point of their equality  $T_0$  is the phase equilibrium temperature.  $\Delta F$  is determined by the driving forces of an direct or reverse MT. Compensation of “non-chemical” elastic and surface energy contributions requires overcooling or overheating, which determine the temperature hysteresis of the MT (intercritical range).

According to the kinetics of the martensitic phase occurrence (temperature and time relationship), all MTs are divided into two types: athermal and isothermal [3]. It should also be noted that a number of alloys with both MT kinetics was discovered.

Athermal MT has clearly defined critical temperatures of the start and finish of the direct ( $M_s$ ,  $M_f$ ) and reverse ( $A_s$ ,  $A_f$ ) transformations and the temperature hysteresis  $\Delta T$ . The hysteresis  $\Delta T$  at athermal MT can vary from several hundreds (in steels and iron-based alloys) to several tens and units of degrees (in alloys based on non-ferrous and noble metals) [3].

Alloys with isothermal kinetics of MTs can be overcooled in the austenitic state to temperatures lower than the  $M_s$  temperature. Subsequent soaking at a certain or increasing temperature initiates the MT. This type of kinetics was observed in iron-based alloys, and later in some non-ferrous metal alloys.

In the case of a thermoelastic MT, amount of the martensitic phase increases with decreasing temperature. It occurs due to the formation of new martensite crystals formed from earlier emerged ones. A distinctive feature of a thermoelastic MT is the high mobility of martensitic crystal boundaries. It is the result of their coherence with the initial phase and conservation of the arising elastic energy during the transformation.

For thermoelastic equilibrium (between the initial and martensitic phases), the condition of equality between the chemical driving force and the elastic energy arising at the MT must be satisfied. This balance is performed for each formed martensitic crystal [3]. The chemical driving force is almost

constant throughout the chemically homogeneous material, while the energy of elastic deformation is substantially non-uniform in the partially transformed sample. Therefore, when describing an MT, it is necessary to consider thermoelastic equilibrium (with the initial phase) for each individual martensite crystal. In the course of moving the interphase boundary, friction forces also arise, which lead to a deviation from the actual thermoelastic equilibrium and to additional hysteresis of the transformation. Because of elastic deformation field relaxation, plastic accommodation occurs around the martensitic plate. This disrupts the balance of chemical and elastic energy. As a result an irreversible additive component occurs in the total energy change. This situation causes an additional loss of interface mobility, which prevents its reverse movement with rising temperature. Therefore, the reverse MT can occur by “nucleation” and subsequent growth of the initial phase in the martensitic one [3].

### **Effects of inelasticity in titanium nikelide based alloys and their classification**

Martensitic inelasticity along with elasticity and plasticity is the main and special type of deformation behavior of crystalline materials caused by phase transitions. The category of mechanical behavior effects in the Ti – Ni system includes the effects of martensitic inelasticity: shape memory effect and superelasticity. The most important characteristic of the material with these effects is the temperature of direct and reverse phase transitions -  $M_s$ ,  $M_f$ ,  $A_s$ ,  $A_f$ . It indicates the start of the transition to the martensitic phase, the end of the transition to the martensitic phase, the start of the transition to the austenitic phase, the end of the transition in austenitic phase, respectively [4].

Shape memory effect (SME). If a metal accumulates inelastic deformation due to isothermal loading of martensite or plasticity of the

transformation, then it returns the deformation when heated in the temperature range from  $A_s$  to  $A_f$ .

During cyclic heating and cooling of the loaded material from  $M_f$  to  $A_f$ , there is an accumulation and return of deformation in the cooling and heating cycles, respectively, until the material is completely destroyed. This phenomenon is called the effect of repeatedly reversible shape memory [4]. The single shape memory effect is essentially one cycle of the reversible shape memory effect. Experiments show that this phenomenon not only takes place when there is a load, but also without it [5].

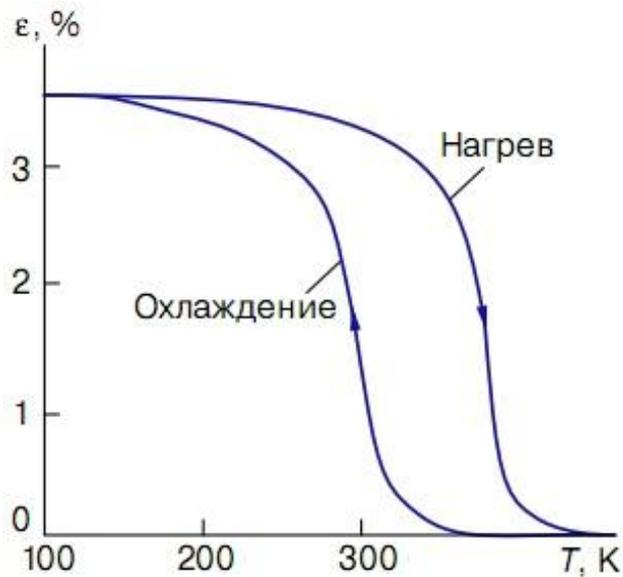


Fig.1. Plot illustrating the shape memory effect

The mechanism of the SME is as follows. Crystals of the martensitic phase form when the material cooled below  $M_s$  without loading. The austenite  $\rightarrow$  martensite transition process is carried out by shifting the atoms from the positions of the original bcc lattice to a new one. This is accompanied by a change in the shape of the initial unit cell of the B2 phase. However, the shear directions in different grains of the B2 phase are distributed randomly. This is beneficial energetically, since it minimizes the internal stresses caused by the deformation. But at the same time, the resulting deformation of the sample shape in any direction is close to zero. That is, despite significant deformation

in microscopic volumes, there is no macroscopic change in the sample shape, due to the “disorder” in the local shift directions.

A special feature of the thermoelastic martensitic transformation is the following - during the reverse transformation, atoms shift reversibly into the positions of the initial lattice, thereby restoring the shape and orientation of the initial grains. The growth of new phase crystals during cooling under load is due to the matching of the martensitic shift vectors phase and direction of external applied stresses. Macroscopic inelastic deformation accumulates as a result of oriented growth in the volume of the martensitic domain.

In materials with thermoelastic martensitic transformations, such deformation mechanism is realized, in which the atoms shift slightly relative to each other. This makes possible for them to return when external conditions change to opposite ones. In the case of general plastic deformation, atoms shift on considerable (much more than interatomic) distances relative to their neighbors and therefore do not have the ability to “remember” the return path [5].

Superelasticity (SE) is the ability to recover accumulated (during loading) deformation after removing the external load at a constant test temperature.

Let us assume that an external stress is applied to a crystal in the austenitic state, at a deformation temperature  $T_d$ . According to with the thermodynamic equation of Clausius - Clapeyron the temperature  $M_n$  :

$$\frac{d\sigma_M}{dT} = \frac{\rho q}{T_0 \varepsilon_M}$$

(where  $\rho$  is the density of the material,  $q$  is the specific enthalpy of transformation,  $\varepsilon_M$  is the inelastic deformation at the martensitic transition,  $T_0 \approx (M_n + A_k) / 2$  is the temperature of the high and low temperature phases equilibrium in the absence of stress [2]) will increase as well as the boiling point of a liquid under pressure increases.

At some value of stress, it reaches or exceeds the value of  $T_d$ . This means that the transformation of austenite  $\rightarrow$  martensite has begun.

If we now remove the load, then the characteristic temperatures ( $M_s, M_f, A_s, A_f$ ) will return to the initial value [4]. And the following consequence is: when  $T_d > A_f$ , formed martensite will be completely thermodynamically unstable. This means that it will inevitably turn into austenite during the load removal, and the accumulated deformation will return [2].

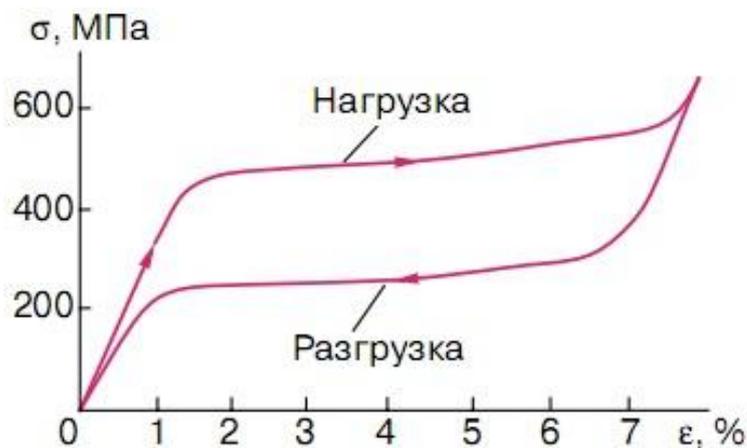


Fig. 2. Plot illustrating the effect of superelasticity

If  $A_s < T_d < A_f$ , that is, the material will demonstrate partly the shape memory effect, and partly the superelasticity effect. The physics of these processes is completely equivalent. The shape memory effect acts as an unrealized superelasticity.

Finally, when  $T_d < A_s$ , the formed martensite is stable and the unloading is not accompanied by superelasticity. There will be two ways to restore deformation then:

- by heating the metal, when the deformation returns due to the SME;
- by loading in the opposite direction.

Since the process of alternating loading can be repeated many times, and since the stress–strain curves obtained here are like magnetic hysteresis loops, this mechanical appearance of martensitic inelasticity is often called ferroelasticity [2].

Reactive stresses. Let us assume that the sample (in the martensitic state) is fixed in a rigid device, and then subjected to heating above the temperature  $A_f$ . It could restore the accumulated deformation in the temperature range of the reverse martensitic transformation since the geometric reversibility of martensitic transformations implies the mandatory return of inelastic deformation when heated.

. However, because of the device constraint, the material begins to generate mechanical stresses, while doing work, either on the external environment, or on deforming itself. Such mechanical stresses are called reactive ( $\sigma_r$ ). The start of their generation occurs on the temperature  $A_s$ , and the intensive growth  $\sigma_r$  - on the interval  $A_s - A_f$ . Subsequent growing of  $\sigma_r$  until saturation continues at temperatures above  $A_f$ . Depending on the composition, a decrease in  $\sigma_r$  is observed at temperatures of 600–700 K. It is associated with the relaxation of the stresses generated by the material. In titanium nickelide-based alloys,  $\sigma_r$  can reach 0.7–0.8 GPa [7]. Martensitic transformations form the basis of numerous structural transformations, due to which controlled changes in the properties of crystalline materials are performed using thermal and mechanical processing [2.5].

### **Effect of surface modification on the inelastic properties of titanium nickelide-based alloys**

Most modern construction materials for medicine are not completely biocompatible with the human body. It can lead to the occurrence of complications and rejection of the implant. At the same time, as a result of corrosion, metal products can lose some of their basic properties: strength and ductility of a material decrease, electrical and optical properties degrade, the surface of the product deteriorates, components of alloys in the form of metal ions irrevocably dissolve in body fluids and tissues.

Presence of nickel as a toxic element in equal proportions with titanium in titanium nickelide and its alloys for a long time prevented medical use of this material. However, TiNi exhibits elastic properties of superelasticity and shape memory, similar to the properties of living tissues.

Nickel is a necessary trace element that participates in a variety of processes in the human body (regulation of DNA metabolism, metabolism of fats, providing cells with oxygen). Nevertheless, Ni atoms are introduced into cells at their higher concentration. As a result it causes disruption of metabolic and enzymatic processes and causes carcinogenic products. After its implantation into the internal organs, the pathological hypersensitivity reaction of the organism is often observed. Moreover, nickel accumulates predominantly in the tissues of the heart, lungs and kidneys [8]. It can cause allergic reactions, anemia, increased excitability of the central and vegetative nervous system. Chronic nickel intoxication increases the risk of neoplasia (lungs, kidneys, skin) due to the effect on DNA and RNA.

Obviously, the presence of protective layers on the surface of TiNi implants would significantly reduce the risk of toxic reactions to its presence in the implant. These layers must be formed from chemical elements tolerant to living tissue, limiting nickel penetration into the biological medium.

To solve these problems, the effects of various surface modifications of a substance are investigated in order to change its properties. It is known [9] that surface layers of the sample are primarily involved in the deformation during mechanical loading. Also the state of the surface and the near-surface layers have a significant influence on the plastic flow processes [10].

Currently there are many methods for modifying the surface of a material with charged particles flow. The most common methods are ion- or electron-beam effects, laser irradiation. Choice of a particular technique depends on the individual task, but generally, its application allows obtaining

an increase in functional properties of surface modified layers without changing the properties in the bulk of the material.

### **Low-energy high-current electron beams for surface modification**

Use of electron beams with high energy densities underlies the new ways of modifying metallic materials. These methods allow the formation of surface layers with fundamentally new structures and properties.

As a result of the electron-beam effect, an area with modified physical-mechanical and chemical properties is formed in the material surface layers. This allows significant increasing of the corrosion resistance, wear resistance, microhardness of the material surface layer [11].

Electron beams transfer energy to a material due to elastic and inelastic collisions of electrons with atoms of the material crystal lattice. In case of the inelastic interaction of an electron with a nucleus, its kinetic energy is spent on the nucleus excitation and X-ray bremsstrahlung. When an electron is scattered on the atom nucleus of the irradiated substance, electron will move rapidly. According to Maxwell's equations, an electrically charged particle moving with acceleration radiates electromagnetic waves. In this case, this radiation is called X-ray bremsstrahlung. The effect of electron deceleration in the field of atomic electrons is even weaker. Thus, X-ray bremsstrahlung plays an insignificant role in the interaction of an electron beam with the target.

The energy of an electron beam absorbed by a substance ultimately transforms into thermal energy. Temperature of the solid will increase continuously and at some point of time will reach the melting point at sufficient electron beam power density.

After that, if heating continues, the body will begin to melt. At the end of the electron beam exposure, the molten material cools and solidifies.

Since the both processes of melting and cooling of the molten material are superfast (the duration of the electron beam effect can be on the order of several microseconds), it is possible to form both crystalline and amorphous structures in the surface layer [11].

In addition, the effect of pulsed electron beams leads to the stresses appearance in the material surface layers. In the case of alloys with thermoelastic martensitic transformations (particularly in titanium nickelide based alloys) it can lead to a change in the MT's temperatures.

There is a large number of works devoted to the effect of electron beam processing on inelastic properties of titanium nickelide. In particular, the influence of pulsed electron processing on TiNi in a nitrogen atmosphere was studied in [12]. The use of this technique allows creating a surface layer that prevents release of aggressive ions from the material. This treatment does not worsen the degree of alloy form restoring. However, it leads to a change in temperatures of the MT.

It was shown in [13], that the effect of an electron beam on the surface titanium nickelide leads to ten times increase in hardness (hardness/stress-deflation at the destruction time) in the near-surface layer (~ 400 nm in depth).

It was observed in [28] that pulsed electron beams irradiation of TiNi in an argon atmosphere leads to a significant decrease in concentration of carbon and oxygen impurity atoms, which are naturally adsorbed in the surface layers of the samples. Using pulsed electron processing of TiNi in a nitrogen atmosphere allows to create a TiN layer on the surface of TiNi, which prevents the release of nickel ions from the material. In this case, the treatment does not reduce the degree of alloy shape recovery. However, it leads to a change in temperatures of the MT [14].

Articles [15, 16] are devoted to the electron beam modification of the titanium nickelide surface layer. Nevertheless, the structural state of the TiNi alloy, which has undergone cyclic melting and recrystallization, is not highlighted. This work is devoted to the study of atomic crystal microstructure of a TiNi alloy by methods of transmission electron microscopy. This structure was formed as a result of a thin surface layer melting under a LEHCEB exposure.

Low-energy electron beam treatment has a number of advantages:

- chemical composition of the processed material does not change;
- distribution of the absorbed energy over the target depth practically does not depend on the optical properties of the material surface and its phase state;

- a significant beam cross-section area is achievable (efficiency of this method is considerably higher than that of other methods based on the charged particles flow).

Combination of high energy density, short processing time, almost complete absorption of electrons by the target makes electron beam exposure a unique and highly effective tool for targeted modification of the metallic materials structure and properties.

### **Ion implantation**

Ion implantation is the introduction of impurity atoms into a material surface due to the irradiation of the surface with accelerated ions. Ion implantation into metals is used to increase their strength, hardness, wear resistance, fatigue properties, corrosion resistance, etc. This processing allows introduction of almost any impurity, any element of the Periodic System into the surface layer of a material and change the composition of this layer at a

depth of 0.1–0.2  $\mu\text{m}$ . This method is most acceptable for modifying the surface of the TiNi alloy, since it is used at temperatures close to room temperature. Accordingly, the microstructure and properties of the material does not significantly changes due to the secondary phases liberation.

The advantage of this method is gradient distribution of the implanted element concentration in surface layers. Moreover, the modified layer does not have a clearly defined interface with unmodified material layers. This means that the physical and mechanical properties of these layers have a smooth change in depth.

Ion bombardment of a target results in penetration of ions into the target. Ions introduction becomes significant at an ion energy  $E > 1 \text{ keV}$  [17]. Ions gradually lose energy after multiple collisions, are scattered and eventually either are reflected back or stopped, being distributed in depth. The energy losses are caused by both interaction with the target electrons (inelastic collisions) and nuclear pair (elastic) collisions, in which energy is transferred to the target atoms as a whole and the direction of the particle movement changes abruptly [18].

When ions are introduced into the crystal lattice of the material, structural defects appear. The atoms knocked out from the lattice sites lead to the formation of vacancies and structural defects in the form of interstitial atoms introduced. The same defects arise when the ions are jammed between the lattice sites. Accumulation of such defects forms dislocations and entire dislocation clusters.

General disorder of the crystal lattice during ion bombardment is called radiation damage. Studies show that radiation damage can positively change the mechanical, electrical and other properties of the metal surface layer, but can also reduce the performance of parts. In the latter case, annealing is used. Temperature activation accelerates atomic rearrangement

and it leads to a higher thermodynamic stability of an ordered crystal lattice [19].

The ion trajectory is a complex polygonal line consisting of path segments between elementary scattering events at large angles. The distribution function of stabilized ions throughout the depth of a sample has a maximum (the distance between the maximum point and the surface is determined by the mean free path of ions of a given energy (Fig. 3)).

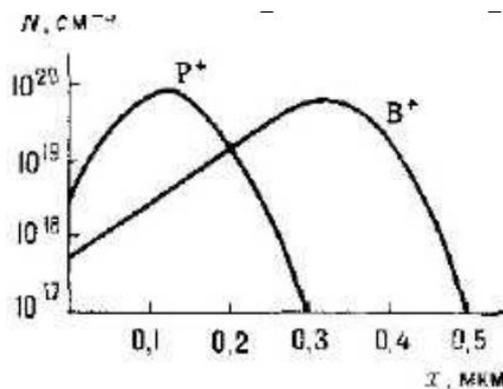


Fig.3 Distribution over depth  $x$  of ions B and P, implanted and Si:  $\epsilon = 100$  keV, dose of ions  $10^{13}$   $\text{cm}^{-2}$ . For ions B,  $R_{cp} = 300$  nm,  $\Delta R = 73$  nm, for P,  $R_{cp} = 124$  nm,  $\Delta = 46$  nm, ( $N$  is the number of ions  $1 \text{ cm}^3$ ).

Important characteristics of the ion implantation process are the ion projective range  $R_{pr}$  — projection of the trajectory path on the direction of the initial particle movement, as well as the distribution of implanted atoms throughout  $R_{pr}$ , (i.e. depth  $x$  when implanted normally to the target surface) [17]. Distribution of particles implanted in an amorphous target throughout  $x$  is characterized by mean free path  $R_{mp}$ , by the root-mean-square spread of the  $\Delta R$  and by the parameter  $S_k$ , which determines the asymmetry of the Pearson distribution (Fig. 3). These values depend on  $M_1$ ,  $M_2$  and  $\epsilon_0$ . When  $S_k = 0$ , the Pearson distribution becomes Gaussian. In the case of ion implantation into single crystals, distribution of implanted particles over depth may change due to the charged particles channeling. By changing the ion energy during the ion

implantation process, distribution of the introduced impurity over the desired depth can be obtained [18-19].

It was observed in literature that high-dose implantation of an alloy based on TiNi with non-metallic oxygen [20] and phosphorus [21] ions leads to an increase in hardness, biocompatibility, and corrosion resistance.

It was also shown in [21] that temperatures of the direct and reverse martensitic transformations changed in the  $\text{Ti}_{49.7}\text{Ni}_{50.3}$  alloy after ion implantation with phosphorus. Moreover, the sequence of transformation changed as well: the martensitic transformation  $\text{B} \rightarrow \text{B19}'$  proceeds without the formation of the R – phase, whereas before ion implantation, the reverse martensitic transformation in this alloy was carried out according to the pattern  $\text{B19}' \rightarrow \text{R} \rightarrow \text{B2}$ .

In [22], the effect of high-dose implantation with  $\text{Ca}^+$  ions with doses of  $1 \times 10^{17}$  and  $5 \times 10^{17}$  ion  $\text{cm}^{-2}$  on  $\text{Ti}_{49.8}\text{Ni}_{50.2}$  alloy was studied. As a result of ion-radiation exposure, a layer with a high concentration of calcium, titanium and calcium oxides, is formed directly under the material surface. At the same time, irrespective of the irradiation dose,  $\text{Ca}^+$  ions treatment did not lead to any significant changes in the shape memory effect in the  $\text{Ti}_{49.8}\text{Ni}_{50.2}$  alloy. Also there was almost no effect on the MT temperatures, which is probably due to the low radiation dose.

A high-dose implantation of  $\text{Ni}_{50}\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{10}$  alloy with  $\text{Mo}^+$  ions was carried out in [23]. As a result, the maximum reversible deformation in implanted samples was 10% higher (on average) than in non-implanted ones. Plasticity of the entire material volume before fracture increases due to the creation of a modified deformation structure in these layers, which prevents the formation of cracks,

Studies of the effect of high-dose ion implantation on the surface layers [24, 25] and on the physical-mechanical and inelastic properties [13, 25-27] of bulk  $\text{Ti}_{49.5}\text{Ni}_{50.5}$  alloy were carried out. The surface layers were

modified using ions of  $\text{Ti}^+$ ,  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Zr}^+$  (exposure doses ranged from  $0.7 \times 10^{17}$  to  $5.6 \times 10^{17}$  ion  $\text{cm}^{-2}$ ).

According to the results, it is clear that both the deformation parameters of the SME (accumulated and returned inelastic deformations) and the temperature parameters of the SME (temperature of the ends of the accumulation intervals and the return of the deformation) does not depend on the chemical element of the modifying ion and weakly depends on the radiation dose. One of the most important positive effect of the radiation exposure on the surface layers of TiNi-based alloys is the formation of a nickel-free and nickel-depleted layer following it. As a result, concentration of nickel coming to the surface and turning into a chemical solution (a simulator of the biological environment) is reduced by an order of magnitude.

### **Magnetron Deposition**

Magnetron sputtering is the most promising way for deposition of thin-film coatings of complex chemical composition (oxides, nitrides, carbides, carbonitrides, etc.). This method has the following advantages: relatively high deposition rates, high degree of adhesion of a coating to a substrate, possibility of obtaining coatings with uniform thickness over a large area of the substrate, possibility of obtaining of chemical compound films of a given composition. The problem of this method is the irreproducibility of the coating composition during its formation in the "transitional" modes of magnetron discharge burning. At the same time, the "transitional" modes are of considerable interest for obtaining coatings with a wide range of concentrations of the metal and gas components, as well as obtaining an acceptable rate of their growth. The sputtering process can be stabilized in "transient" modes by stabilizing the state of the cathode – plasma – substrate system by controlling the flow rate of the reactive gas [28].

The formation of films during magnetron sputtering occurs from the streams of particles formed both in the low-temperature discharge plasma and because of the physical deposition of the target material. For this reason, properties and structure of the coatings are determined by the state and parameters of the magnetron discharge plasma: chemical and component composition; density, kinetic and potential energy of particles [29].

Let us consider film magnetron deposition, as a physical process. A glowing discharge at a constant current ignites between the cathode and the anode in an inert gas medium (most often argon) at a reduced pressure of 0.1-1 Pa. This leads to a continuous resumption of charged particles (electrons and ions) in the discharge by impact ionization of neutral atoms in electron-atom collisions. If there is no magnetic field, argon ions move rapidly towards the cathode, acquiring energy close to the potential difference cathode-anode. If a potential difference is about hundreds of volts - units of kV, intense physical cathode spraying occurs. Sprayed neutral particles of the cathode material leave the cathode with an energy of units - tens of eV. Then the particles are deposited on the substrate or walls of the vacuum chamber, forming a film coating there. In this case coatings are formed in different way due to relatively high energy of sputtered particles compared with the energy of particles during thermal evaporation [30].

In literature, there are also studies of the physical-mechanical properties of TiNi based alloys with surface layers modified by chemical-thermal methods. Thus, it was shown in [31] that saturation of the surface layers of TiNi based alloys with nitrogen leads to a significant increase in their corrosion resistance.

It was observed in [32] that when the sample is oxidized, an oxide film is created on its surface. This film also leads to an increase in the corrosion resistance of TiNi-based alloys, but the effect of superelasticity in

these alloys deteriorates. The reason is the formation of a Ti-rich surface layer in which martensite is not formed under the action of deformation.

In [33], gold coatings with thicknesses of 0.5 and 4  $\mu\text{m}$  were formed by the electrochemical method on the surface of the TiNi alloy for medical purposes. According to the results, the thicker gold coating is, the less the amount of returning deformation is.

It was shown in [35], that as a result of magnetron deposition of tantalum on the surface of the TiNi alloy, nanostructured two-phase ( $\alpha\text{-Ta}$  +  $\beta\text{-Ta}$ ) coatings are formed. The coatings do not significantly change the structural-phase states in the regions of the substrate material near the coating.

The magnetron sputtering method was used in [36] to create titanium coatings ( $\sim 1.1 \mu\text{m}$  in thickness) on the  $\text{Ti}_{49.4}\text{Ni}_{50.6}$  alloy surface. It is noted that already at 1% deformation of the sample, the coating cracks and peels off. This is due to the embrittlement of the coating material and to the deterioration of the adhesion of the film and the substrate during the martensitic relief formation. Thus, another condition must be satisfied - inelastic properties of the coating must be comparable to the inelastic properties of TiNi.