

На правах рукописи

Гальцев Александр Владимирович

**Закономерность проявления эффекта Баушингера в деформационно
упрочненных после закалки металлах с ГЦК – структурой на примере
чистого никеля**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Камышанченко Николай Васильевич

Белгород – 2008

Работа выполнена в Белгородском государственном университете

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: доктор физико-математических наук,
профессор **Камышанченко Н.В.**

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: доктор физико-математических наук,
профессор **Федоров В.А.**

кандидат физико-математических наук,
доцент **Беленко И.А.**

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: **Физико-технический институт имени
А.Ф. Иоффе.**

Защита состоится «25» ноября 2008 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.015.04 Белгородского государственного университета по адресу: 308007, г. Белгород, ул. Студенческая, 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белгородского государственного университета.

Автореферат разослан «___» октября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Беленко Владимир Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Первые исследования упруго-пластических свойств металлов при знакопеременном деформировании были сделаны в последней четверти 19 века Иоганном Баушингером. На образцах железа и мягкой стали им было замечено деформационное старение, появление при разгрузке и повторном нагружении петли гистерезиса, упрочнение при многократном приложении растягивающих напряжений и другие процессы, изучение которых до сих пор привлекает внимание исследователей. Наиболее интересным открытием в этой области, вошедшим в литературу под названием эффекта Баушингера, является изменение напряжения течения деформированных поликристаллических материалов при перемене знака деформирования.

К настоящему времени эффект Баушингера обнаружен практически у всех исследованных кристаллических тел и считается одной из особенностей деформированного состояния материалов. К изучению его физической природы возвращались много раз по мере накопления новых данных по этому явлению и представлений о процессе пластической деформации кристаллов. Однако только с развитием дислокационной теории пластической деформации появилась возможность объяснения процессов, приводящих к эффекту Баушингера.

Интерес к исследованиям эффекта Баушингера определяется многими причинами.

Во-первых, исследования особенностей знакопеременного деформирования и физической природы эффекта Баушингера дают важные сведения о микронапряжениях, возникающих при деформации, микромеханизмах пластической деформации и упрочнения кристаллических тел. Экспериментально подтверждено, что деформационное упрочнение и эффект Баушингера внутренне связаны.

Во-вторых, по характеру изменения деформации материала за один цикл знакопеременного нагружения с определенной амплитудой в некоторых случаях можно судить о закономерности между деформацией за первый цикл и числом циклов до разрушения, т.е. прогнозировать долговечность материалов в области малоциклового усталости.

И, наконец, эффект Баушингера приходится учитывать при эксплуатации изделий, изготовленных из наклепанных материалов.

Анализ литературы показывает, что имеются разработки и предложения по уменьшению влияния эффекта Баушингера на прочностные свойства металлов и сплавов. В исследованиях было обнаружено, что отжиг предварительно деформированных материалов при определенных температурах изменяет величину предела текучести и уменьшает эффект Баушингера. Эффект Баушингера характерен для двойняющих материалов. Подавление эффекта Баушингера, например, при обратном двойниковании кристаллов кальцита наблюдается только в результате промежуточного отжига под нагрузкой. Уменьшение влияния эффекта Баушингера может быть

достигнуто путем нанесения тонкой оксидной пленки на изделие, а также путем проведения отжига в момент достижения насыщения деформационного упрочнения и др.

Поскольку величина эффекта Баушингера определяется в основном реверсивным дальнодействующим взаимодействием дислокаций, то величина его зависит от структурных факторов, влияющих на подвижность дислокаций.

Большинство экспериментальных исследований были проведены на сплавах или металлах, насыщенных растворенными атомами углерода, азота или другими примесями. В них положительное влияние на уменьшение эффекта Баушингера оказывают все факторы, создающие условия сопротивлению разупрочнения, уменьшению скорости возврата и способствующие торможению диффузионных процессов, а также создающие стабильные препятствия движению дислокаций.

Практически до настоящего времени нет эффективного способа воздействия на эффект Баушингера для чистых металлов. Применение разработанных ранее методов уменьшения эффекта Баушингера для сплавов не дает заметного положительного эффекта из – за малой концентрации примесных атомов и других причин. Поэтому существует необходимость в дополнительных исследованиях процессов и изменения физико-механических свойств после термомеханического воздействия на чистые металлы с ГЦК – структурой, способствующих уменьшению влияния эффекта Баушингера.

Таким образом, тема исследований является актуальной как в научном, так и в ее прикладном аспекте.

Цель работы. Создание неравновесного состояния вакансий и вакансионных комплексов, полученных закалкой от высоких температур, пластического деформирования с последующим старением под напряжением в упругой области для создания равновесного распределения дефектов в объеме исследуемого металла в целях подавления влияния эффекта Баушингера.

При этом ставились следующие задачи:

- 1) изучение механизма воздействия вакансий и вакансионных комплексов на возникновение и развитие эффекта Баушингера в процессе низкочастотного знакопеременного нагружения с фиксированной амплитудой;
- 2) исследование влияния эффекта Баушингера на механические характеристики никеля с различным исходным состоянием структуры при знакопеременном изгибовом нагружении с фиксированным радиусом огибания при комнатной температуре в зависимости от величины амплитуды и числа циклов;
- 3) исследование влияния структурного состояния исследуемого металла на поверхностные свойства и релаксационную стойкость образцов никеля, происходящих в результате знакопеременного низкочастотного изгибового нагружения;

- 4) изучение электропроводности и энергетических параметров внутреннего состояния образцов, подвергнутых знакопеременному изгибовому нагружению, в зависимости от структурного состояния исследуемого никеля.

Научная новизна работы. Установлена возможность подавления эффекта Баушингера в металлах с ГЦК – структурой высокой чистоты на примере никеля марки Н0 при помощи деформационного упрочнения закаленного металла от предплавильных температур с последующим старением под напряжением, не превышающим предела текучести при температуре ниже температуры рекристаллизации.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Возможность подавления эффекта Баушингера в металлах с ГЦК – структурой высокой чистоты на примере поликристаллического никеля марки Н0 при помощи деформационного упрочнения с остаточной деформацией до 2% закаленного металла от предплавильных температур с последующим старением под напряжением не превышающим предела текучести при температуре ниже температуры рекристаллизации.
2. Влияние созданной термомеханическим воздействием дефектной структуры на электромеханические свойства исследуемого никеля.
3. Использование физико-механических характеристик для определения внутреннего энергетического и поверхностного состояния структуры исследуемого металла, созданной в процессе механико-термического воздействия после закалки.

Практическая ценность работы. Полученные результаты позволяют расширить существующие представления о влиянии различных факторов (концентрации вакансий, вакансионных комплексов, размеров зерна, температуры, числа циклов и амплитуды знакопеременного нагружения и др.) на эффект Баушингера в чистых металлах с ГЦК – структурой.

Поскольку наиболее заметное проявление эффекта Баушингера наблюдается в области малых деформаций и низкочастотном знакопеременном нагружении, то его изучение имеет непосредственное практическое значение для деталей и конструкций реальных устройств, испытывающих упругопластические деформации.

Результаты исследований могут быть полезны для современного машиностроения, самолетостроения, систем автоматики и в других отраслях, детали которых испытывают низкочастотные знакопеременные напряжения.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы были представлены на следующих научно–технических конференциях:

1. XVII Международная конференция «Петербургские чтения по проблемам прочности». – Санкт Петербург, 2007 г.

2. IV Международная школа – конференция «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений» (MPFP). – Тамбов, 2007 г.
3. 47 Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» – Нижний Новгород, 2008 г.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 6 научных работах. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад соискателя. В работах, выполненных в соавторстве, автору принадлежит подготовка и отладка экспериментальных установок, проведение экспериментов, обработка полученных результатов, участие в их обсуждении и подготовке материала для публикаций в открытой печати и на конференциях.

Основные результаты, приведенные в диссертации, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 205 наименований. Содержание работы изложено на 161 страницах, в 49 рисунках и 21 таблице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, на основе которой определены научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В **первой главе** приведен обзор литературы, в которой рассмотрена, сущность эффекта Баушингера, проанализированы способы определения эффекта, а также существующие способы подавления эффекта.

Особое внимание уделено обсуждению вопросов, связанных с возникновением остаточных и ориентированных микронапряжений, объяснению с их помощью эффекта Баушингера и других явлений, наблюдающихся при знакопеременном нагружении поликристаллических материалов. Рассмотрены представления о силах сопротивления движению дислокаций при пластической деформации кристаллов. Дано краткое описание возвратного движения дислокаций при разгрузке и перемене знака нагружения.

В заключение обзора сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Вторая глава посвящена аппаратуре, материалам и методике исследований.

При исследовании свойств чистого никеля сравнивались три партии образцов. Первая партия отжигалась при температуре 1273 К в течение 60 минут (плотность дефектов составляет $10^3 - 10^5 \text{ см}^{-3}$). Вторая партия закалялась от температуры 1373 К в воду, что позволило увеличить плотность дефектов в виде вакансий и вакансионных комплексов до $10^7 - 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Однако дислокационная структура при этом не отличается высокой плотностью. Третья партия после закалки деформировалась с остаточной деформацией около 2% с последующим старением под напряжением $\sigma_H = 0.5\sigma_{0.2}$ при комнатной температуре в течение 2 часов, что способствует увеличению количества дислокаций с одновременным их закреплением. Образцы всех партий подвергались изгибовой повторно-переменной деформации с помощью приспособления, схематически изображенного на рис.1,

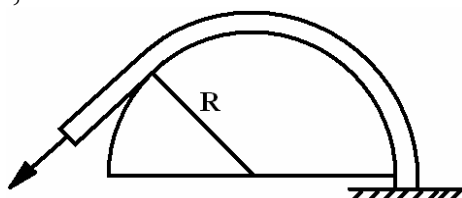


Рис.1. Изгиб образца вдоль цилиндрической поверхности.

с радиусом обжатия соответственно 15; 20; 25; 30 и 35мм в одностороннем или двустороннем направлении (рис. 2).

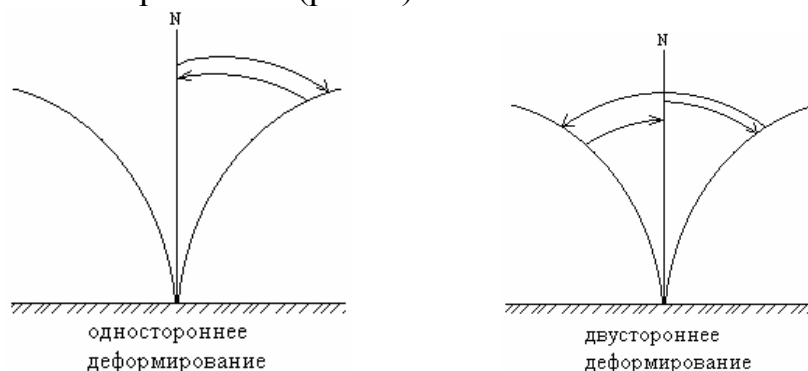


Рис.2. Схематическое изображение одностороннего и двустороннего деформирования.

Даны описания установок для механических испытаний, исследования релаксационных процессов, измерения микротвердости и электросопротивления. Описан метод исследования микрорельефа поверхности образцов с помощью сканирующего зондового микроскопа «Смена – А».

Третья глава посвящена выявлению зависимости поведения прочностных характеристик чистого никеля марки Н0 от режимов механико-термической обработки.

В *разделе 3.1* рассматривается влияния вакансий и вакансионных комплексов на механические свойства металлов.

Влияние точечных дефектов на кинетику пластической деформации весьма разнообразно: точечные дефекты могут быть основными носителями пластической деформации (диффузионной ползучести, краудинной пластичности и др.), имитировать скорость неконсервативного движения дислокаций, служить центрами закрепления дислокаций.

В реальных металлах и сплавах, где присутствует значительное процентное содержание различного рода примесей, имеются естественные

условия образования точечных дефектов в виде атомов внедрения, замещения, вакансий и их комплексов.

Однако в чистых металлах таких возможностей нет и поэтому разработаны принудительные технологические способы, которые позволяют повышать содержание точечных дефектов в объеме металла. Одним из таких способов может быть закалка от высоких температур. Повышение предела текучести после быстрого охлаждения от высоких температур в чистых металлах позволили сделать предположение, что за наблюдаемый эффект ответственны вакансии, сохраняющиеся в металле при быстром охлаждении. Было установлено, что упрочнение наблюдается непосредственно сразу после закалки, но явно выраженное упрочнение отмечается после дальнейшего температурно-временного старения.

Возникновение и наличие в кристаллах дефектов, в том числе и вакансионных, вызывает смещение атомов в решетке, их перегруппировку, что приводит к созданию полей напряжений.

В *разделе 3.2* рассмотрены внутренние напряжения, создаваемые дефектами кристаллической решетки.

Наличие дефектов в кристалле вызывает перегруппировку и смещение атомов в локальном объеме и создают поля напряжений. Так вокруг точечного дефекта имеются радиальные смещения и поле напряжений. Ближайшие к вакансии атомы релаксируют в ее сторону примерно на 2%, а релаксация соседей межузельного атома в обратную сторону составляет $\sim 10\%$. Поэтому искажение вокруг межузельных атомов и их скоплений больше, чем вокруг вакансий и вакансионных комплексов. Компоненты полей деформаций и напряжений, создаваемые точечными дефектами в кристалле, изменяются с расстоянием очень быстро (r^{-3}). Величина напряжения вокруг дислокации с удалением от ядра убывает значительно слабее (r^{-1}) в сравнении с поведением напряжений вокруг точечных дефектов. По своему направлению действие полей напряжений зависит от вида дислокаций. Если поле напряжений краевой дислокации состоит из нескольких компонент направления, то винтовая – только касательные направления действия.

Теоретически и экспериментально установлено, что концентрация точечных вакансионных дефектов в металлах, необходимая для создания центров закрепления дислокаций, пропорциональна плотности дислокаций.

Наличие дислокаций, вакансий и их комплексов приводит к их взаимодействию под действием возникших напряжений.

Раздел 3.3 посвящен исследованию влияния термоциклического воздействия на структуру и электромеханические свойства технически чистого никеля.

При повторных нагревах и охлаждениях, как и при одноразовой закалке, происходят процессы изменения концентрации вакансий и дислокаций. Часть из них остается в матрице в виде тетраэдров или других комплексов. Часть вакансий аннигилируют путем захлопывания вакансионных дисков с образованием дефектов упаковки, ограниченных дислокациями Франка.

Последние в свою очередь вновь способны генерировать вакансии. Об этом, в частности, подтверждает поведение электрического сопротивления (рис.3)

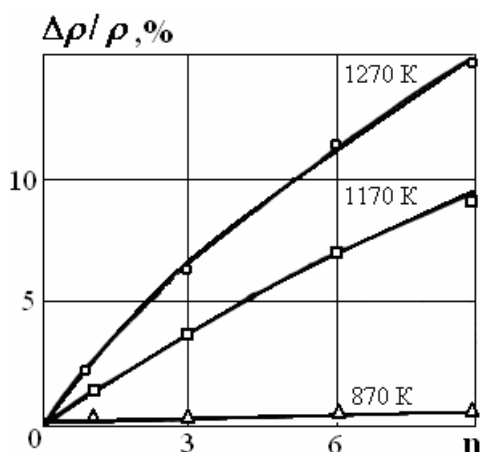


Рис.3. Характер изменения электросопротивления никеля в процессе циклического изменения температуры.

Из рисунка видно, что с повышением температуры до $(0,6 - 0,7)T_{пл}$ и количества циклов происходит рост электрического сопротивления.

Дополнительные исследования обнаружили уменьшение прироста электросопротивления при дальнейшем повышении температуры.

О наличии остаточных напряжений в металле подтверждают экспериментальные данные, полученные на образцах никеля.

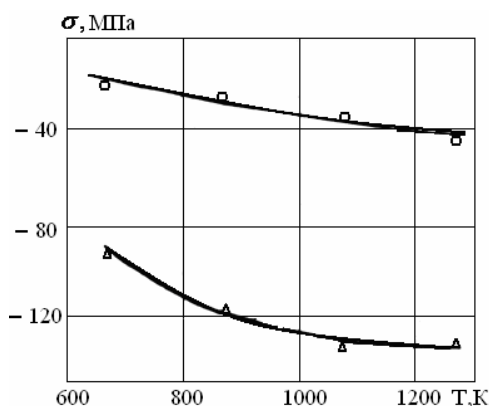


Рис.4. Изменение остаточных напряжений в Ni после закалки в зависимости от температуры нагрева и числа циклов (Δ – 1 цикл, \square - 9 циклов.)

Под действием остаточных термических напряжений были отмечены изменения линейных размеров образцов, которые могут быть вызваны изменением плотности дефектов.

Изменение остаточных напряжений Ni и линейных размеров, как это видно из рис.4 и рис.5, наблюдается качественная закономерность в идентичном поведении этих параметров.

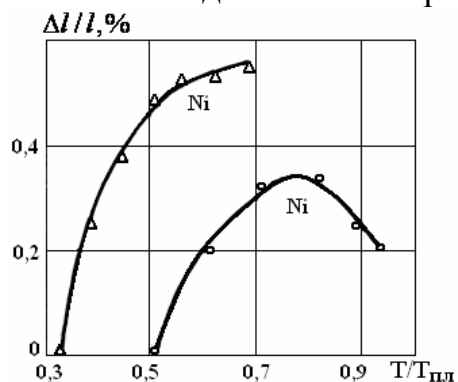


Рис. 5. Изменение линейных размеров Ni в результате циклического изменения температуры Δ – 1 цикл, \square - 9 циклов.

При термоциклическом воздействии в никеле по всей вероятности возможна одновременная реализация нескольких механизмов. Существенную роль в никеле играют механизмы образования и взаимодействия между дефектами. При этом роль вакансий является доминирующей.

Раздел 3.4 посвящен изучению взаимодействия точечных дефектов с дислокациями в закаленных чистых металлах с ГЦК – решеткой.

Кинетику взаимодействия точечных дефектов с дислокациями удобно проследить на образцах закаленных от высоких температур с последующей деформацией на малую степень при низких температурах, но достаточных для процесса перераспределения вакансий.

В качестве металла для исследования был выбран поликристаллический алюминий чистотой 99,995%. Деформирование осуществлялось растяжением с последующим старением (рис.6).

В таблице 1 приведены значения пределов текучести отожженных образцов и прошедших закалку от различных температур в воду при температуре испытания 77К.

Таблица 1.

№ п/п	$T_{\text{зак.}}, \text{K}$	Предел текучести при 77К, $H / \text{м}^2 \cdot 10^7$	Величина закалочного упрочнения, $H / \text{м}^2 \cdot 10^7$	Расчетная концентрация вакансий $C_v \cdot 10^{-4}$
1	отожженный	0,35	–	–
2	673	0,53	0,18	2,0
3	773	0,93	0,58	11,0
4	823	1,1	0,75	20
5	873	1,2	0,85	37,5
6	923	1,35	1,00	120

С повышением температуры нагрева перед закалкой происходит увеличение концентрации вакансий и монотонное возрастание величины предела текучести после закалки. Максимальное значение начального упрочнения достигается после закалки с предплавиальной температуры в охлажденную до 273К воду. Последующий отжиг при температуре 273К сопровождается дальнейшим повышением микропластической деформации в макроупругой области.

В объеме материала в результате температурного отжига происходит объединение вакансий в более сложные структуры. Так как алюминий отличается высокой чистотой, то после закалки и последующего отжига образуются объемные дефекты, в основном из вакансий, которые и будут главными носителями пластической деформации, способствующими созданию сопротивления движению дислокаций.

Прирост $\Delta\sigma(t)$ характеризуется наличием максимума, величина и время достижения которого зависит от температуры, при которой происходит повторное деформирование, скорости и величины предварительной деформации (рис.7). Увеличение предела текучести в результате

низкотемпературного старения под нагрузкой более устойчиво и при последующем отогреве до комнатной температуры.

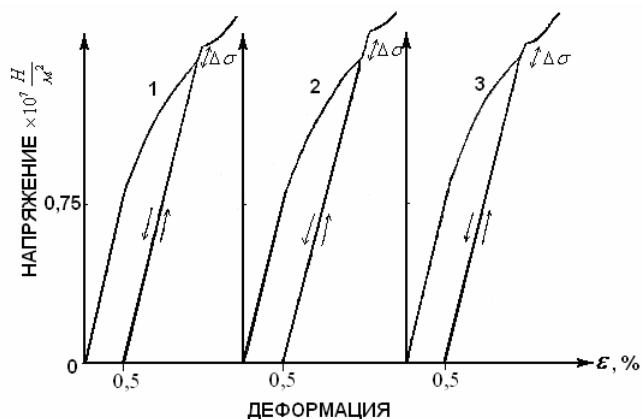


Рис.6. Зависимость прироста напряжения течения чистого (99,995%) алюминия от времени старения (t_c) при 77К после закалки с 823К и величины остаточной деформации $\sim 0,5\%$ при 77К, $t_c = 600$ с (1), 1800 с (2), 4200 с (3).

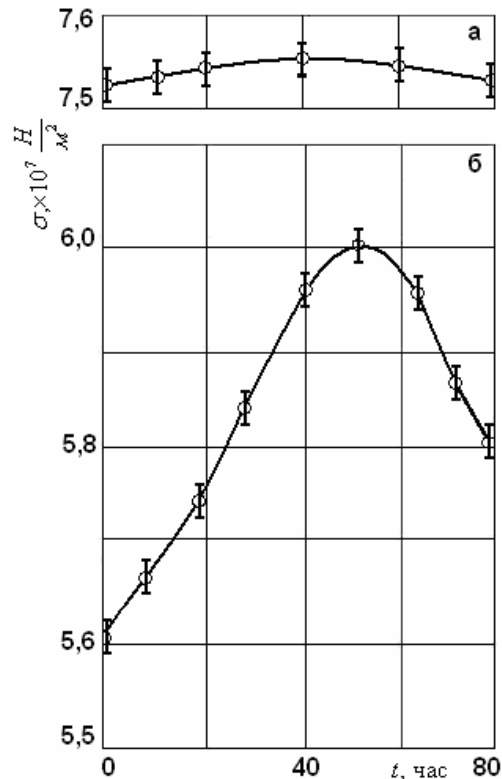


Рис.7. Зависимость прироста напряжения течения закаленного алюминия от времени старения при 77К после быстрого (а) и медленного нагружения (б) до $\varepsilon = 0,5\%$.

Рост напряжения течения на начальной стадии старения деформированного после закалки алюминия является следствием возникновения вакансионных атмосфер вокруг дислокации благодаря превышению количества подхода вакансий к дислокациям над числом их аннигиляции на ступеньках и других стоках. Снижение $\Delta\sigma$ со временем низкотемпературного старения свидетельствует об уменьшении плотности центров закрепления на дислокациях.

Максимум прироста напряжения течения, по – видимому, соответствует условию равновесия скоростей образования и распада центров закрепления на дислокациях.

Существующие и вновь возникшие в процессе закалки в кристаллах дефекты вызывают смещение атомов в решетке, их перегруппировку, что приводит к созданию полей напряжений. Внутренние напряжения в дефектных кристаллах определяют многие процессы их пластического деформирования, упрочнения и разупрочнения.

Величина внутреннего напряжения определяется не только количеством, типом дефектов, но и пространственным расположением всего ансамбля дефектов в целом. Взаимодействуя между собой и решеткой, дефекты стремятся занять энергетически более выгодное положение. Минимуму свободной энергии реальных кристаллов соответствует определенное (упорядоченное) расположение дислокаций и других дефектов.

Применение низкотемпературного старения под напряжением способствует более эффективному протеканию процессов закрепления дислокаций и преодоления сил сопротивления.

Т.е., закалочные вакансии в процессе диффузионного перемещения способны создать «атмосферы» вокруг дислокаций. Концентрация точечных дефектов в металлах, необходимая для создания центров закрепления дислокаций, пропорциональна плотности дислокаций. Поэтому с повышением степени деформации алюминия после закалки величина и время достижения максимального прироста напряжения течения в процессе низкотемпературного старения снижается. С ростом плотности дислокаций увеличивается число стоков для вакансий и сокращается среднее расстояние от вакансии до дислокации.

В *разделе 3.5* рассматривается влияние дефектной структуры на электромеханические свойства никеля марки Н0, подверженного знакопеременному нагружению.

Раздел 3.5.1 посвящен изучению влияния эффекта Баушингера на механические свойства исследуемого никеля.

Установлено, что величина предела текучести и микротвердости, характер их изменения зависит не только от количества циклов, но и от вида и радиуса огибающего знакопеременного низкочастотного нагружения.

Нагружение производилось с таким расчетом, чтобы в каждом цикле амплитуда пластической деформации сохранялась постоянной. Подобная методика нагружения позволила избежать трудности определения величины остаточной деформации, которая подвержена изменениям от цикла к циклу.

Условия упрочнения при изгибовом знакопеременном нагружении отличается от условий упрочнения при растяжении и сжатии, кручении или сдвиге.

При огибании вдоль цилиндрической поверхности, упрочнение идет весьма быстро в начале деформации. Дальнейшее охватывающее огибание образца вдоль поверхности с равномерной скоростью распространяет перемещение существующих и вновь образованных дислокаций до второго свободного конца.

При этом исходное состояние кристаллической структуры оказывает определяющее влияние на скорость и величину упрочнения ($\Delta\sigma_{0.2}$) (рис. 8) и микротвердость (рис.9).

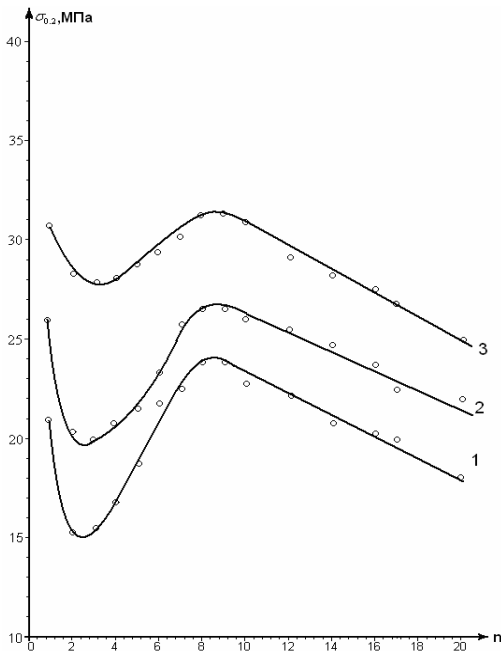


Рис. 8. Зависимость предела текучести от количества циклов при полном знакопеременном нагружении. $R=35$ мм. 1, 2, 3 – соответственно первая, вторая и третья партии. Погрешность измерений 5 – 7%

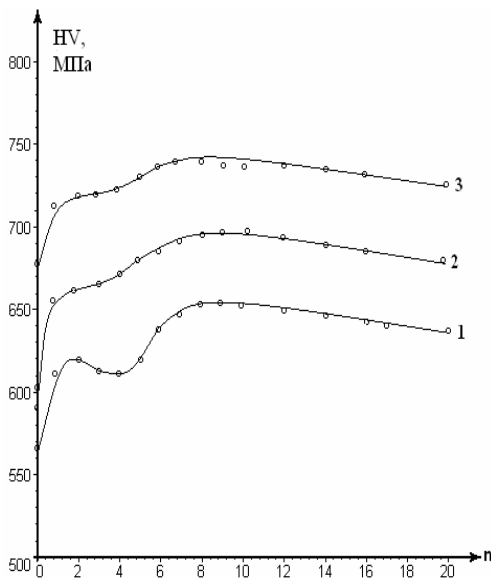


Рис.9. Зависимость микротвердости от количества циклов при полном знакопеременном нагружении. Радиус изгиба $R=35$ мм. 1, 2, 3 – соответственно первая, вторая и третья партии. Погрешность измерений 5 – 7%

Увеличение прироста механических характеристик связано с образованием в кристалле устойчивых барьеров. Известно, что началу развития II стадии деформации соответствует лавинообразный процесс генерирования дислокаций источниками. Испущенная источником дислокационная петля распространяется в плоскости скольжения и выходит на границы раздела или задерживается перед препятствием, например, у границы зерна, блока или у барьера Ломера – Котрелла. Последние представляют собой эффективные барьеры, у которых возникают нагромождения дислокаций. Число дислокаций увеличивается пропорционально деформации, и образование барьеров Ломера – Котрелла происходит на протяжении всей II стадии.

На III стадии упрочнения оно меньше, чем на II стадии. Причину, очевидно необходимо искать в возникновении поперечного скольжения, которое увеличивает сдвиговую деформацию и уменьшает вклад в упрочнение каждой дислокационной петли.

Однако развитие и образование площадки, где прирост напряжения текучести и микротвердости несколько замедляется, отличается прежде всего величиной начала и конца этого процесса и его протяженностью в зависимости от структурного состояния.

В первой партии и начало и конец этого процесса более протяженный и по абсолютной величине изменения предела текучести существенно больше в сравнении со второй и особенно третьей партией. Кроме того, на эти параметры влияет радиус огибания вдоль цилиндрической поверхности.

Под влиянием внешних сил источники дислокаций испускают новые дислокации, которые «поджимаются» к «барьеру» действием поля напряжений, созданных внешними силами. Это приводит к образованию скоплений у барьера почти параллельных дислокаций одинакового знака. Для сжатия скоплений и присоединения к нему новых дислокаций требуется все большие усилия и для увеличения деформации образца требуется существенное увеличение внешних сил. Имеет место упрочнение до определенного момента, когда в голове скопления у многих барьеров концентрация внутренних напряжений достигает критической величины, что приводит к формированию взаимодействующего ансамбля из точечных дефектов и дислокаций. В результате взаимодействия происходит в первую очередь поглощение точечных дефектов краевыми компонентами дислокаций, а также путем поперечного скольжения взаимодействия винтовых компонентов дислокационных петель. По мере развития пластической деформации происходит истощение вакансионных дефектов и процессы аннигиляции краевых и винтовых составляющих динамической структуры реализуются полностью.

Поведение образовавшихся у этих препятствий скоплений дислокаций при нагрузке и разгрузке образца оказывает последствие эффекта Баушингера и релаксационные процессы в металлах. Поэтому барьеры Ломера - Коттрелла являются причиной внутрикристаллического упрочнения еще в период легкого скольжения.

В однофазных материалах величина сопротивления деформированию может быть приближенно описана соотношением:

$$\tau_R = \tau_j + \alpha G b \rho^{1/2} \quad (1)$$

Здесь τ_R – статическое сопротивление движению дислокаций; в τ_j – соединены все механизмы недислокационного сопротивления скольжению дислокаций; $\alpha G b \rho^{1/2}$ – все механизмы торможения дислокаций, обусловленные междислокационными взаимодействиями.

Условие, при котором дислокации после их генерации будут двигаться на значительные расстояния в объеме кристалла, состоит в том, что

$$\tau \geq \tau_R \text{ или } \tau \geq \tau_j + \alpha G b \rho^{1/2} \quad (2)$$

Таким образом, плотность дислокаций, напряжение течения и структура в какой-то степени связаны между собой.

Наблюдаемое увеличение микротвердости, как известно, обуславливается появлением либо новых ступенек на дислокациях, либо дислокационных петель, что способствует увеличению одновременно и предела текучести.

Уменьшение микротвердости при циклическом нагружении может быть связано с полигонизацией и контролироваться скоростью диффузии и концентрацией вакансий. Как следует из экспериментальных данных, наибольший эффект при этом характерен для образцов первой партии.

После достижения максимального прироста механических параметров наблюдается их быстрый спад, что говорит об образовании повреждаемостей в объеме кристалла, количество которых накапливается малыми порциями от цикла к циклу.

В сравнении с неполным знакопеременным нагружением при полном нагружении на результирующие значения предела текучести оказывает большее влияние эффект Баушингера (рис. 8, 9). Так, образцы третьей партии обладают меньшим влиянием эффекта Баушингера, чем образцы второй и особенно первой партии. Дислокации при этом, очевидно, закреплены таким образом, что они примерно одинаково сопротивляются перемещению в противоположных направлениях.

Достижение максимального прироста предела текучести зависит от радиуса изгиба (амплитуды нагружения) исследуемого образца. И если для первой партии характерно заметное расхождение величин прироста предела текучести для оптимального радиуса изгиба, то для второй партии и особенно для третьей эти расхождения существенно уменьшаются (таблица 2).

Таблица 2.

Зависимость величины прироста предела текучести от способа обработки

Партия	$\sigma'_{0.2\max}$	$\sigma''_{0.2\max}$	$\Delta\sigma = \sigma'_{0.2\max} - \sigma''_{0.2\max}$
1	27,5	25,75	1,75
2	30,5	29,5	1
3	39,2	38,4	0,8

В разделе 3.5.2 рассматриваются особенности изменения электрических параметров при знакопеременном нагружении.

Электросопротивление металлов обладает повышенной чувствительностью к концентрации и характеру распределения дефектов в кристаллической решетке. При введении дефектов в решетку металлов их электрическое сопротивление возрастает. Любое искажение идеальной периодической решетки приводит к рассеянию электронов проводимости и, следовательно, к увеличению электрического сопротивления. Экспериментальные результаты представлены на рис. 10.

Рост электросопротивления с увеличением деформации связан с увеличением плотности дефектов в исследуемом никеле. При достижении определенного значения наблюдается быстрый рост электросопротивления. Это обусловлено образованием в объеме исследуемого никеля повреждаемостей, вплоть до микротрещин и трещин.

Из рисунка 10 видно, что величина площадки задержки электрического сопротивления несколько шире в сравнении с шириной площадки прироста предела текучести (рис.8) и с параметрами микротвердости (рис.9), что говорит о более высокой чувствительности метода исследования с использованием параметров остаточного электросопротивления.

Величина изменения остаточного электросопротивления в начале площадки и в конце зависит от структурного состояния исследуемого никеля и качественно повторяют характерные изменения механических параметров на графиках зависимости прироста предела текучести и микротвердости.

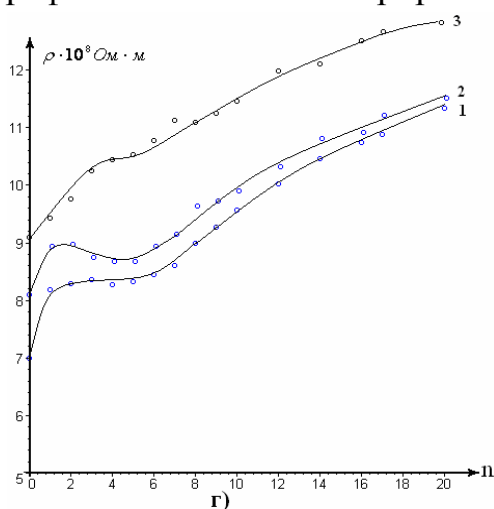


Рис. 10. Зависимость удельного электрического сопротивления от исходного состояния структуры и числа циклов знакопеременного изгибового нагружения при полном цикле знакопеременного изгибового нагружения первой (1), второй (2) и третьей (3) партий соответственно. Измерение при 77 К. Погрешность измерений 5 – 7%

Раздел 3.6 посвящен исследованию влияния структурного состояния никеля высокой чистоты на релаксационные процессы при комнатной температуре.

По величине релаксационного эффекта, как и по фону внутреннего трения, можно судить о степени неоднородности внутренних напряжений в металлах. Чем больше степень неоднородности внутренних напряжений, тем выше декремент затухания колебаний и больше величина релаксационного эффекта.

Явление релаксации, заключающееся в снижении напряжения деформированного твердого тела со временем испытания при условии сохранения постоянной величины начальной деформации, можно представить уравнением вида:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_y + \varepsilon_n = const, \tag{6}$$

где ε_0 – общая начальная деформация, ε_y – упругая и ε_n – пластическая деформация.

Изменение напряжения в зависимости от времени испытания можно описать выражением

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \frac{d\varepsilon_y}{dt}, \tag{7}$$

которое позволяет определить упругую часть деформации.

Воспользовавшись этим значением, можно выражение (6) записать в виде

$$\varepsilon_n - \varepsilon_n^0 = \frac{\sigma_0 - \sigma}{\varepsilon}. \quad (8)$$

Здесь σ_0 и ε_n^0 – начальные величины напряжения и значение пластической деформации при релаксационных испытаниях.

Уравнение (8) показывает, что ε_n увеличивается с уменьшением σ , т.е. при условии (6) процесс релаксации следует рассматривать как нарастание (развитие) пластической деформации при одновременном и равном падении упругой деформации.

На образование и протекание релаксационного процесса влияют различные факторы, среди которых внутренние, зависящие от структурного состояния материала, играют важную роль. Низкотемпературная релаксация напряжений (для чистых металлов она ниже $0,25 T_{пл}$, что соответствует условиям, при которых происходил эксперимент) происходит ниже температуры возврата. Пластическая деформация в этом случае обуславливается сдвигом дислокаций по плоскости наилегшего скольжения.

Положительное влияние на релаксационную стойкость оказывают те факторы, которые создают сопротивление разупрочнению, уменьшению скорости возврата и способствующие торможению диффузионных процессов, а также создающие стабильные препятствия движению дислокаций.

В чистых металлах из – за низкой концентрации инородных элементов добиться эффективного значения релаксационной стойкости трудно. Создание неравновесного состояния вакансий и вакансионных комплексов способны в какой – то мере устранить существующий недостаток. Равномерное распределение вакансий и их комплексов внутри зерен, под действием внешнего напряжения, способствует их перемещению и закреплению дислокаций и выравниванию внутреннего напряжения в объеме кристаллического строения.

Известно, что с повышением приложенной нагрузки σ_0 (первый период) процесс релаксации напряжений в начальный период интенсифицируется тем заметнее, чем меньше стабилизирована структура исследуемого металла (табл.3). При этом влияние напряжения сказывается не столько на абсолютную величину падения напряжения $\Delta\sigma$, сколько на скорость снижения напряжения.

Если задаться некоторой величиной $\Delta\sigma$, то при различных значениях σ_0 она достигается через различные промежутки времени τ .

Таблица 3.

№ п/п	Партия 1				Партия 2				Партия 3			
	$\Delta\sigma$ за время $\tau = 30$ (мин)				$\Delta\sigma$ за время $\tau = 30$ (мин)				$\Delta\sigma$ за время $\tau = 30$ (мин)			
	$\frac{\Delta\sigma_1}{\tau}$	$\frac{\Delta\sigma_2}{\tau}$	$\frac{\Delta\sigma_3}{\tau}$	$\frac{\Delta\sigma_4}{\tau}$	$\frac{\Delta\sigma_1}{\tau}$	$\frac{\Delta\sigma_2}{\tau}$	$\frac{\Delta\sigma_3}{\tau}$	$\frac{\Delta\sigma_4}{\tau}$	$\frac{\Delta\sigma_1}{\tau}$	$\frac{\Delta\sigma_2}{\tau}$	$\frac{\Delta\sigma_3}{\tau}$	$\frac{\Delta\sigma_4}{\tau}$
1	0,27	0,083	0,33	0,017	0,27	0,07	0,03	0,016	0,15	0,06	0,027	0,01
2	0,27	0,05	0,03	0,013	0,14	0,04	0,027	0,013	0,09	0,03	0,013	0,01
3	0,1	0,017	0,02	0,008	0,1	0,03	0,023	0,006	0,05	0,03	0,017	0,007

Было обнаружено, что чем выше σ_0 , тем короче время, необходимое для достижения заданной величины $\Delta\sigma$ и наблюдаемые закономерности находятся в зависимости от исходного состояния исследуемых партий.

Зависимость оставшегося (конечного) напряжения σ_τ от начального (σ_0) определяется влиянием последнего на протекание процесса релаксации в обоих периодах. В данном эксперименте при $T_{\text{эм}} \ll 0,25T_{i\text{э}}$ степень увеличения интенсивности процесса релаксации в первый период за счет повышения величины σ_0 (в пределах до $0,9\sigma_0$) такова, что в конечном счете более высокое начальное напряжение приводит к более высокому оставшемуся напряжению (табл.4).

Таблица 4.

№ п/п	партия	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_0 , МПа			σ_τ за время $\tau = 180$ (мин), МПа		
			σ'	σ''	σ'''	σ'_τ	σ''_τ	σ'''_τ
1	партия 1	20	18	14	6	6,5	3,75	2,3
2	партия 2	25	22,5	17,5	7,5	14	10	3,5
3	партия 3	32,8	29,52	22,96	9,84	21,5	18	6

Здесь σ' – начальное напряжение при $\sigma_0 = 0,9\sigma_{0,2}$, σ'' – начальное напряжение при $\sigma_0 = 0,7\sigma_{0,2}$, σ''' – начальное напряжение при $\sigma_0 = 0,3\sigma_{0,2}$, σ'_τ – оставшееся (конечное) напряжение при $\sigma_0 = 0,9\sigma_{0,2}$, σ''_τ – оставшееся (конечное) напряжение при $\sigma_0 = 0,7\sigma_{0,2}$, σ'''_τ – оставшееся (конечное) напряжение при $\sigma_0 = 0,3\sigma_{0,2}$.

Взаимосвязь начального и оставшегося (конечного) напряжения (или начального напряжения и падения напряжения $\Delta\sigma$) наглядно представлены графиками « $\sigma_0 - \sigma_\tau$ » (рис. 11, а) и « $\sigma_0 - \Delta\sigma$ » (рис. 11, б).

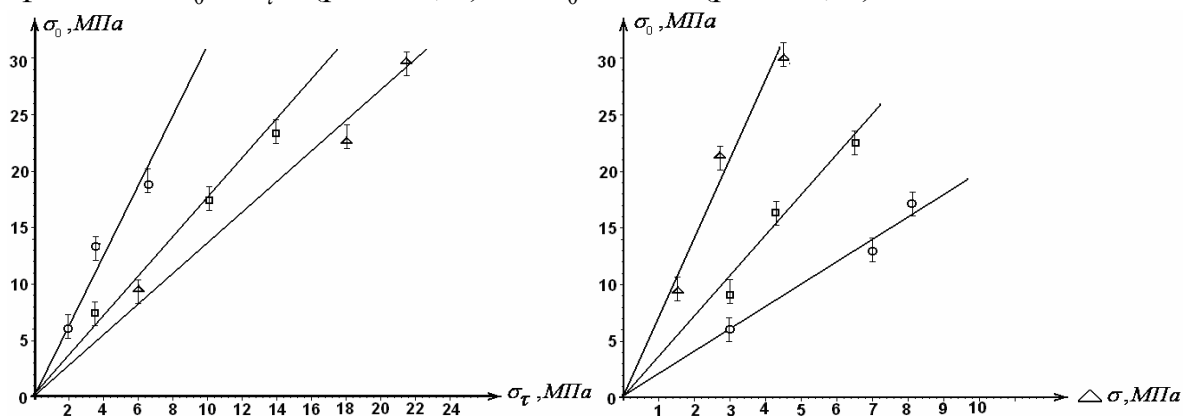


Рис.11. а - схематические зависимости $\sigma_\tau = f(\sigma_0)$, б - схематические зависимости $\sigma_\tau = \Delta(\sigma_0)$. \circ – партия 1, \square – партия 2, \triangle – партия 3.

Такие зависимости, $\sigma_\tau = f(\sigma_0)$ и $\Delta\sigma = f(\sigma_0)$, характерны для чистых металлов до определенного значения σ_0 и температуре $0,25T_{\text{пл}}$.

Четвертая глава посвящена исследованию физических методов для определения внутреннего энергетического и поверхностного состояния структуры исследуемого никеля.

Раздел 4.1 посвящен исследованию влияния деформационного старения на поверхностное состояние никеля.

Как показали экспериментальные результаты, предложенная методика обработки образцов позволяет избежать интенсивного развития полос скольжения, а соответственно интрузий и экструзий.

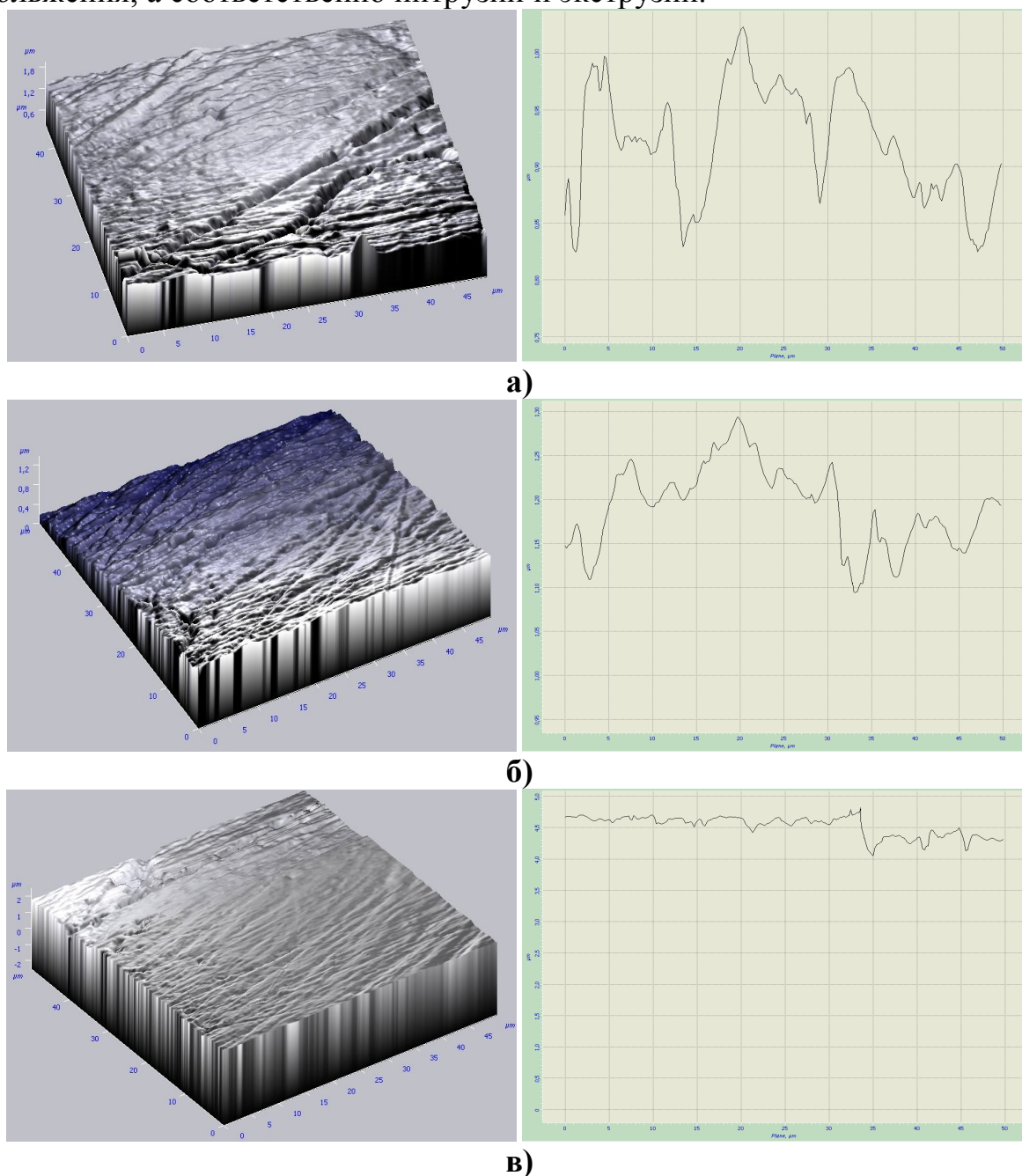


Рис.12. Состояние поверхности при полном знакопеременном нагружении. а) – первая партия, б) – вторая партия, в) – третья партия.

Из рисунка 12 видно, что в образцах, деформационно упрочненных после закалки с остаточной деформацией до 2% с последующим старением под нагрузкой не превышающим предела текучести при температуре ниже температуры рекристаллизации, величина интрузий и экструзий значительно меньше чем в закаленных и особенно в отожженных образцах.

Развитие деформационного упрочнения при знакопеременном нагружении связывают с образованием барьеров Ломера – Котрелла и с

одновременным увеличением скользящих дислокаций по плоскостям кристаллической структуры. Плотность петель дислокаций в плоскости скольжения увеличивается с изменением стадии деформационного упрочнения. Эту закономерность связывают с интенсификацией развития линий скольжения. При достижении определенной плотности в плоскости скольжения, при наличии напряжений, дислокация стремится совершить поперечное скольжение. В противном случае происходит увеличение плотности линий смещения и образованию полос смещения в процессе потери дислокаций скопившихся вблизи интенсивной линии.

Таким образом, процесс расширения полос скольжения теснейшим образом связан с размножением дислокаций. В результате усиливающегося поперечного скольжения, которое увеличивает сдвиговую деформацию и уменьшает вклад в упрочнение каждой петли дислокации, происходит резкое уменьшение упрочнения на третьей стадии. В металлах с ГЦК – структурой скольжение происходит в основном в плоскостях (111). Такая ограниченность перемещения способствует быстрому деформационному упрочнению, но одновременно приводит к интенсивному развитию полос скольжения.

Наличие многочисленных коротких линий скольжения, густота их расположений и интенсивность развития полос скольжения характерна для первой партии образцов.

Для отожженных образцов совершенно неэффективны, при малых пресыщениях дефектов, процессы переползания. Поэтому с увеличением числа циклов знакопеременного изгибового нагружения наблюдается резкое увеличение не только плотности линий, но и полос скольжения, выходящих на поверхность (рис 12, а)

При больших пресыщениях, созданных резкой закалкой, процесс переползания может проявляться более активно. Сконденсированные у дислокаций вакансии, наряду с увеличением стопоров, способствуют более раннему процессу переползания дислокаций, что несколько уменьшает плотность полос скольжения в сравнении с отожженными (рис. 12, б).

Развитие полос скольжения с одновременным увеличением плотности линий скольжения говорит о неупорядоченном состоянии структуры

В исследованиях Крамера И.Р. и Верещагина Л.Ф. было обнаружено, что с помощью достаточно коротких импульсов напряжения можно создать дополнительное скольжение в плоскостях (123). Такая особенность изменения структурного состояния, проявляющихся при определенных термомеханических условиях, была использовано в образцах третьей партии. В результате старения под напряжением деформационно упрочненных после закалки образцов позволили создать структуру с лучшими показателями прочностных свойств и избежать интенсивного развития полос скольжения (рис. 12, в)

Раздел 4.2 посвящен исследованию энергии, запасенной в процессе деформации.

Проведенные исследования на никеле сравнительно высокой чистоты установили зависимость энергетических параметров от исходного

внутреннего состояния и условий знакопеременного деформационного воздействия: радиуса изгиба, количества циклов и способа циклического нагружения. В частности, было установлено, что величина запасенной энергии при комнатной температуре уменьшается с увеличением числа циклов и радиуса изгиба (рис.13) и (таблица 5, 6).

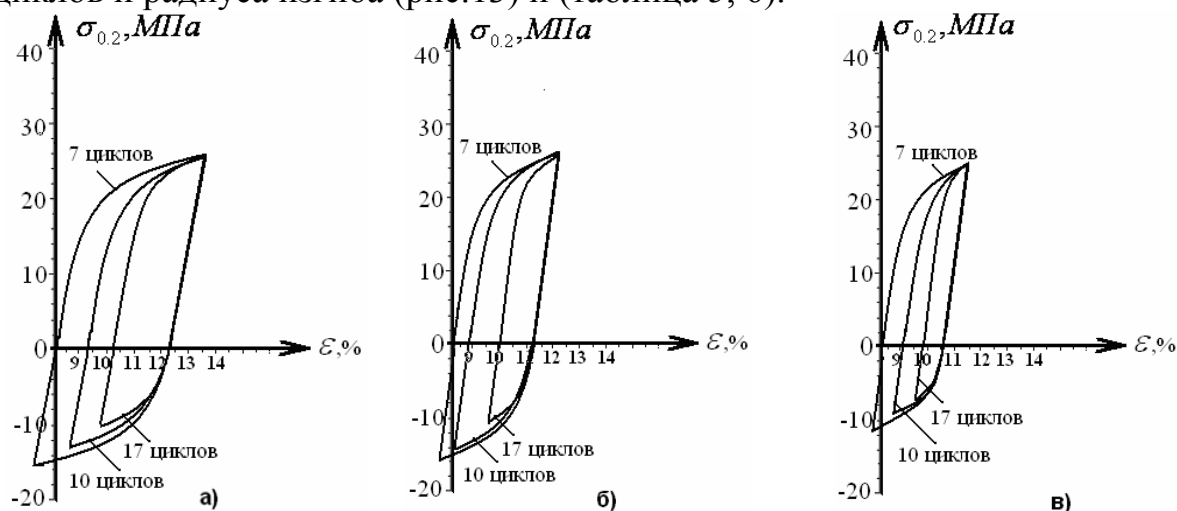


Рис. 13. Гистерезисная петля для первой (а), второй (б) и третьей (в) партий. Радиус изгиба 35 мм.

Таблица 5.

Площадь петли механического гистерезиса S (мм^2) при полном цикле изгибовой деформации.

n	$S, \text{мм}^2$														
	$R_1 = 15 \text{ мм}$			$R_2 = 20 \text{ мм}$			$R_3 = 25 \text{ мм}$			$R_4 = 30 \text{ мм}$			$R_5 = 35 \text{ мм}$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
7	15.3	13.5	12	14.75	13	11.3	14	12.35	10.7	13.5	11.8	9.8	12.7	11	9
10	13	11.5	9.3	11.5	10.1	8.7	10.5	9.4	8	10	9.3	7.7	9.5	8.7	7.2
17	6.5	5	4.5	6	4.6	3.8	5.7	4	3.3	5	3.5	3	3	2.5	2

Здесь n – число циклов, S – площадь петли механического гистерезиса, 1 – партия 1, 2 – партия 2, 3 – партия 3, R – радиус обжатия.

Таблица 6.

Ширина петли механического гистерезиса l (мм) при полном цикле изгибовой деформации.

n	$l, \text{мм}$														
	$R_1 = 15 \text{ мм}$			$R_2 = 20 \text{ мм}$			$R_3 = 25 \text{ мм}$			$R_4 = 30 \text{ мм}$			$R_5 = 35 \text{ мм}$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
7	0.7	0.6	0.53	0.63	0.53	0.5	0.57	0.5	0.45	0.53	0.47	0.41	0.51	0.42	0.38
10	0.42	0.4	0.35	0.4	0.38	0.35	0.35	0.31	0.28	0.31	0.27	0.22	0.33	0.27	0.22
17	0.34	0.3	0.38	0.3	0.28	0.24	0.27	0.22	0.2	0.23	0.2	0.21	0.24	0.22	0.18

Здесь n – число циклов, l – ширина петли механического гистерезиса, 1 – партия 1, 2 – партия 2, 3 – партия 3, R – радиус обжатия.

В процессе деформации основная доля затраченной энергии превращается в тепло, а остальная поглощается дислокациями, точечными дефектами и др.

Количественное соотношение этих частей зависит от условий деформации, например, от температуры, при которой происходит деформирование, количества циклов. Скорость возрастания запасенной энергии увеличивается тем медленнее, чем больше величина деформации.

Эти зависимости, по результатам экспериментальных данных, представлены на рис.13.

Полученные результаты позволяют утверждать: с увеличением числа циклов нагружения площадь и ширина петли механического гистерезиса заметно уменьшается, что говорит о зависимости запасенной энергии от числа циклов, радиуса изгиба и исходного состояния никеля, а именно: наибольшая величина ее отмечается в образцах первой партии, уменьшается в закаленных образцах (партия 2) и существенно уменьшается в деформационно – состаренных образцах (партия 3).

Т.о., величина запасенной энергии зависит от структурного состояния, что говорит об энергетическом состоянии внутренних напряжений.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.

1. В работе рассматривается механизм взаимодействия дислокаций с образованными дефектами после закалки и последующего механико-термического воздействия, позволивший установить физическую закономерность повышения прочностных характеристик в исследуемом никеле, на примере алюминия.
2. Впервые применение после закалки от предплавильной температуры и последующего деформирования с незначительной остаточной величиной деформации (до $\varepsilon \leq 2,0\%$) и старения под нагрузкой не превышающей упругих значений при комнатной температуре позволило активизировать процесс взаимодействия между дефектами образовавшимися в процессе закалки и дислокациями, как старыми, так и вновь образованными в результате деформирования. В результате чего происходит существенное подавление эффекта Баушингера в чистом никеле с ГЦК – структурой.
3. Исследование релаксационных свойств, состояния поверхности, изменения механической гистерезисной кривой позволило утверждать о создании устойчивой и сравнительно уравновешенной структуры в чистом никеле в процессе закалки от предплавильной температуры и последующего механико-термического воздействия с незначительной величиной остаточной деформации и старения под нагрузкой в упругой области при температуре не превышающей температуры рекристаллизации.
4. Впервые на примере никеля экспериментально доказано, что применение несложных и недорогостоящих технологических процессов возможно создание структуры, способной существенно подавить эффект Баушингера в чистых металлах с ГЦК – структурой.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

- 1) Гальцев, А.В. Особенности поведения Ni и Al при термоциклическом воздействии / А.В. Гальцев // Сборник студенческих научных работ. Выпуск IX. Часть 1 / Белгород – 2005. – С.7 – 12.
- 2) Камышанченко, Н.В. Особенность развития микропластической деформации в закаленном от различных температур поликристаллическом Ni / Н.В. Камышанченко, А.В. Гальцев // Материалы XXXII Международной молодежной научной конференции «ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ» / Москва – 2006. – С. 18 – 19.
- 3) Камышанченко, Н.В. Исследование влияния термоциклического воздействия на структуру и электромеханические свойства технически чистого никеля / Н.В. Камышанченко, И.М. Неклюдов, А.В. Гальцев // Материалы XVII Международной конференции «Петербургские чтения по проблемам прочности», Ч.1./Санкт – Петербург. – 2007. – С.120 – 122.
- 4) Камышанченко, Н.В. Эффект Баушингера в закаленном и деформационно-состаренном никеле / Н.В. Камышанченко, А.В. Гальцев, И.М. Неклюдов // Материалы IV Международной школы – конференции «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений» (MPFP): материалы шк.-конф./ ТГУ им. Г.Р. Державина. – Тамбов. – 2007. – С. 343 – 351.
- 5) Камышанченко, Н.В. Исследование влияния вакансий и вакансионных комплексов на предел текучести Al, подвергнутого деформационному старению / Н.В. Камышанченко, И.М. Неклюдов, А.В. Гальцев // Известия высших учебных заведений, раздел «Физика», Томск. – 2008. – №3 – С. 18 – 20.
- 6) Камышанченко, Н.В. Сравнительные характеристики эффекта Баушингера в зависимости от исходного состояния структуры никеля / Н.В. Камышанченко, И.М. Неклюдов, А.В. Гальцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – №7 – С. 16 – 21.