

На правах рукописи



Новицкая Ольга Сергеевна

**МНОГОМАСШТАБНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ
МОНОКРИСТАЛЛОВ СТАЛИ ГАДФИЛЬДА ПРИ СУХОМ ТРЕНИИ
СКОЛЬЖЕНИЯ**

Специальность 1.3.8.

Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор **Лычагин Дмитрий Васильевич**

Научный консультант:

кандидат технических наук **Филиппов Андрей Владимирович**

Официальные оппоненты:

Иванов Юрий Федорович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук

Плотников Владимир Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Алтайский государственный университет"

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Защита диссертации состоится «3» марта 2023 г. в 16³⁰ час. на заседании диссертационного совета 24.1.135.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) по адресу:

634055, г. Томск, проспект Академический, 2/4, e-mail: ovs@ispms.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФПМ СО РАН и на официальном сайте ИФПМ СО РАН <http://www.ispms.ru>

Автореферат разослан «__» января 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Сизова О.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Среди направлений физики конденсированных сред особое место принадлежит материалам с оптимальными механофизическими свойствами. В настоящее время одним из привлекательных материалов являются высокомарганцевые стали. Ярким представителем таких сталей является сталь Гадфильда, объединяющая в себе комплекс уникальных свойств: износостойкость, прочность, способность к деформационному упрочнению. Это делает ее незаменимым материалом для деталей, работающих на износ и удар одновременно. Управление процессами структурных превращений, повышающих износостойкость пар трения, одна из ключевых задач повышения эффективности работы трибосопряжений.

Исследование закономерностей развития пластической деформации при трении осложнено многогранной природой процесса трения, которая определяется неоднозначным влиянием множества явлений, происходящих в зоне трения (интенсивное тепловыделение в пятнах контакта, образование и отделение частиц износа, «stick-slip» эффект, фрагментация поверхностного и приповерхностного слоев и др.). Эти явления изменяют условия протекания процесса трения и величину коэффициента трения, что в свою очередь, изменяет условия нагружения в зоне трибоконтакта, порождая неоднородность деформации.

Для фундаментального понимания природы развивающихся при трении деформационных процессов экспериментальные исследования лучше проводить на монокристаллах. Причиной тому является возможность управления действующим механизмом деформации и количеством систем скольжения за счет выбора определенной кристаллографической ориентации и направления приложенной нагрузки.

Степень разработанности. Изучению механизмов, ответственных за высокие прочностные характеристики стали Гадфильда, посвящен ряд исследований под руководством ученых из России: М.А. Штремель, Л.Г. Коршунов, И.Н. Богачев, С.Д. Каракишев, Ю.И. Чумляков, Ю.Ф. Иванов, А.В. Колубаев, Е.А. Колубаев и др. и из-за рубежа: В. Hutchinson, N. Ridley, I. Karaman, D. Canadinc, Y.N. Dastur, P. Chowdhuru, H. Sehitoglu, M. Abbasi и др.

Были проведены обширные исследования микроструктуры, чтобы установить картину механизма деформации, лежащего в основе эффекта упрочнения этого материала. Эти открытия были подкреплены современными методами, такими как цифровая корреляция изображений, дифракция обратно отраженных электронов.

Фундаментальные исследования природы деформационного поведения

стали Гадфильда было проведено на монокристаллах. Изменяя кристаллографическую ориентацию оси деформации и направление нагрузки при одноосной деформации монокристаллов, активизировали механизм скольжения или двойникования. Однако, при трении скольжения на образец действуют две силы – нормального давления и трения, которые направлены вдоль вертикальной и горизонтальной осей образца, соответственно. Такая схема нагружения осложняет оценку действующих на образец нагрузок и анализ его деформационного поведения.

Таким образом, одновременный учет роли кристаллографической ориентации и особенностей напряжения при трении является актуальным для установления механизмов деформации при сухом трении скольжения и влияния на упрочнение, разрушение и износ материала.

Целью работы является установление закономерностей многомасштабных структурных изменений в стали Гадфильда при учете кристаллографической ориентации и схемы напряженного состояния в условиях сухого трения скольжения. Для решения намеченной цели и с учетом комплексного подхода для ее достижения были поставлены следующие **задачи**:

1. Изучить активацию систем сдвига в условиях сложного нагружения для монокристаллов выбранных кристаллографических ориентаций.
2. Исследовать закономерности развития поверхностного рельефа и приповерхностной переориентации монокристаллов стали Гадфильда с различной кристаллографической ориентацией.
3. Проанализировать характер процесса сухого трения скольжения монокристаллов стали Гадфильда с различной кристаллографической ориентацией.
4. Установить влияние кристаллографической ориентации и схемы напряженного состояния на процессы трения и износа.

Научная новизна. Апробирован методологический подход к многоуровневому анализу структурных изменений при сухом трении скольжения ГЦК монокристаллов с учетом неоднородности схемы напряженного состояния у поверхности трения.

Показано, что сложная схема напряженного состояния нивелирует предпочтительный вклад одного из двух механизмов деформации стали Гадфильда (скольжения и двойникования), выявленных при одноосных испытаниях. При испытаниях на трение оба механизма деформации работают без явного предпочтения.

Установлен циклический характер изменения трения и износа для большинства исследованных ориентаций монокристаллов. Процесс трения заключается в последовательных стадиях упрочнения и разрушения материала

повторяющихся неоднократно. Величины износа, хотя и зависят от кристаллографической ориентации, но не определяются предпочтительным действием одного из двух рассмотренных механизмов.

Переориентация монокристаллов в процессе трения приводит к перераспределению напряжений в действующей системе сдвига и способствует активизации новых систем скольжения и двойникования.

Описаны эволюция субструктуры в приторцевой зоне и развитие разориентаций на поверхности трения и по мере удаления от нее.

Теоретическая и практическая значимость работы. В работе развиты представления в области исследований монокристаллов (с различной кристаллографической ориентацией) в условиях сложнонапряженного состояния. Получены теоретические и экспериментальные данные, которые позволили выявить новые закономерности деформации и разрушения стали Гадфильда в условиях сухого трения скольжения. Установленные закономерности позволяют использовать данные, полученные на монокристаллах, для анализа поведения поликристаллической стали Гадфильда с известной текстурой.

Методология и методы диссертационного исследования. В основу научной гипотезы и методологии диссертационной работы положены физические процессы (деформация, нагрев, износ и др.), протекающие при сухом трении скольжения в износостойких ГЦК материалах, представителем которых является сталь Гадфильда.

Для деформации монокристаллических образцов стали Гадфильда выбран метод сухого трения скольжения. Для исследований полученных образцов использованы современные методы изучения свойств и структуры, такие как электронная растровая микроскопия, с использованием приставки дифракции отраженных электронов для определения ориентации микрообластей, просвечивающая электронная микроскопия, конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, измерение микротвердости, механические испытания (скретч-тестирование и испытания на трение).

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Совокупность расчетных и экспериментальных данных, указывающих на то, что в условиях одновременного действия сил нормальной нагрузки и трения отсутствует ориентационная зависимость предпочтительной реализации деформации механизмом скольжения или двойникования.

2. Экспериментальные доказательства цикличности развития деформации в приторцевой области и разрушения монокристаллов стали Гадфильда при сухом трении скольжения.

3. Закономерности изменения структуры монокристаллов стали Гадфильда при сухом трении скольжения, которые заключаются в переориентации макро-, мезо- и микрообластей и активизации новых систем сдвига.

Степень достоверности результатов исследования обеспечена использованием современных стандартизированных методов и применением высокоточных сертифицированных приборов, комплексного многоуровневого подхода к исследованиям, применением калибровки на эталонных объектах, а также повторяемостью выявленных закономерностей.

Личный вклад автора состоит в получении и анализе результатов, представляемой к защите работы, в совместной с научным руководителем постановке цели и задач исследования, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, написании статей по теме диссертации.

Апробация работы. Основные положения и результаты работ, составляющих содержание диссертации, обсуждались на конференциях всероссийского и международного уровня, таких как международная конференция "Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций" (Томск, 2016, 2017, 2018, 2019), Всероссийской конференции с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (Тольятти, 2018), VIII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва, 2019), XVI международная школа-семинар «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах» (Барнаул, 2020), международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (Тольятти, 2021), международная конференция «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (Томск, 2020, 2021, 2022).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 статей в рецензированных журналах, входящих в перечень ВАК РФ и библиографические базы данных цитирования Web of Science и Scopus.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует п. 1 паспорта научной специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния» (отрасль науки – физико-математические): «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления».

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект Ш.23.2.4, а также при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-08-00377_a и НШ-1174.2022.4, соглашение 075-15-20220-797.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов по работе, списка литературы из 219 наименований. Работа изложена на 169 страницах текста, содержит 94 рисунка и 14 таблиц, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована их цель и основные задачи, определена научная новизна, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен литературный обзор по механизмам деформации и деформационному упрочнению высокомарганцевых сплавов и сталей при пластической деформации. Описаны закономерности исследований на трение стали Гадфильда. Рассмотрены механизмы износа. На основе литературных данных сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе описан материал исследования, кристаллографические характеристики монокристаллов, методики проведения экспериментальных исследований.

В качестве объекта исследований выбраны монокристаллы стали Гадфильда (110Г13) с ориентацией осей нормальной нагрузки и трения в углах стандартного стереографического треугольника и близкие к ним. Химический состав стали, вес. %: С – 1.1%, Mn – 12.5%, Si – 0.4%, Ni – 0.15%, Cr – 0.29%, V – 0.035%, Co – 0.04%, Ti – 0.007%, Fe – остальное. Испытания на сухое трение скольжения проводили на трибометре TRIBOtechnic (ИФПМ СО РАН) по схеме «палец-диск» при комнатной температуре 25°C, нормальной нагрузке 21 Н со скоростью скольжения 0,1 м/с. Контртелом служил диск из стали 105WCr6 твердостью 60 HRC. Испытания осуществляли путем последовательных тестов при постоянных условиях. Топографию деформационного рельефа монокристаллов исследовали на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT OLS4100 (ИФПМ СО РАН) и растровом электронном микроскопе Tescan Mira 3 LMU (НИ ТГУ) с катодом полевой эмиссии. Для определения ориентации макро- и микрообластей использовали приставку дифракции отраженных электронов Nordlys. Состав частиц износа определяли на энергодисперсионном микроанализаторе UltimMax 40. Структуру поверхностных и приповерхностных слоев исследовали на просвечивающем электронном микроскопе JEOL JEM-2100 (НИ ТПУ).

В третьей главе представлены результаты расчетов по определению напряжения сдвига для скольжения и двойникования с целью установления влияния каждого из них на процесс деформации. Проиллюстрированы физические процессы, происходящие при деформации, на основе исследования деформационного рельефа на боковых гранях монокристаллов.

Первым этапом работы было изучение развития деформации в приторцевой зоне монокристаллов с разной кристаллографической ориентацией. Системы с максимальными расчетными значениями напряжения для скольжения и двойникования при учете сил нормального давления и трения сравнивали с экспериментально наблюдаемой картиной сдвига. Полученные расчетные значения представлены в таблице 1, а ожидаемая схема следов сдвига при деформации по этим системам показана на рисунках 1 и 3 для одной из исследованных ориентаций монокристалла с разными направлениями силы трения. Результаты следового анализа деформационного рельефа исследованных монокристаллов полностью совпадают с теоретически предполагаемой картиной сдвига (рисунок 2 и 4).

Таблица 1 – Максимальные номинальные действующие напряжения для монокристаллов с разной кристаллографической ориентацией осей нормальной нагрузки и трения

Плоскость сдвига	Плотно-упакованное направление	Суммарное напряжение скольжения ($\tau_{ск}$, МПа)	Вектор Бюргера частичной дислокации	Суммарное напряжение двойникования ($\tau_{дв}$, МПа)	Отношение напряжения двойникования к скольжению ($\tau_{дв} / \tau_{ск}$)
ориентация нормальной нагрузки $[\bar{1}\bar{1}0] / [001]$ ориентация силы трения					
(111)	$[\bar{1}01]$ $[0\bar{1}1]$	1.03	$[\bar{1}\bar{1}2]$	1.19	1.05
$[\bar{1}\bar{1}0] / [\bar{1}10]$					
(111)	$[\bar{1}01]$ $[0\bar{1}1]$	1.03	$[\bar{1}\bar{1}2]$	1.19	1.05
($\bar{1}\bar{1}1$)	$[0\bar{1}1]$ $[101]$	0.66	$[1\bar{1}2]$	0.76	1.15
($1\bar{1}1$)	$[\bar{1}01]$ $[011]$	0.66	$[1\bar{1}2]$	0.76	1.15
$[111] / [2\bar{1}\bar{1}]$					
($\bar{1}\bar{1}1$)	$[110]$ $[101]$	0.68	$[12\bar{1}]$	0.60	0.88
($1\bar{1}1$)	$[110]$	0.56	$[21\bar{1}]$	0.60	1.07
($11\bar{1}$)	$[101]$	0.56	$[2\bar{1}1]$	0.53	0.95

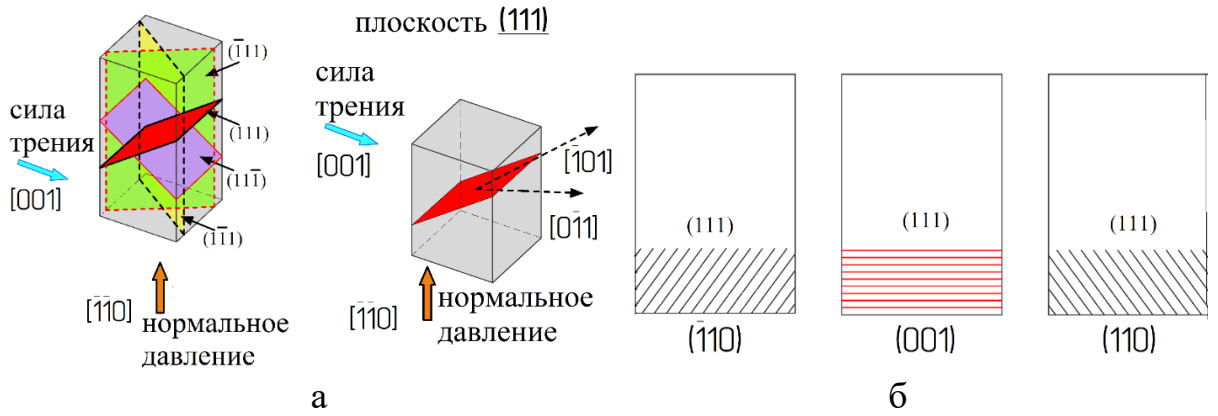


Рисунок 1 – Схемы возможных направлений сдвига и плоскостей скольжения (а) и схемы экспериментально ожидаемой картины следов сдвига (б) $[\bar{1}\bar{1}0] / [001]$ - монокристаллов стали Гадфильда

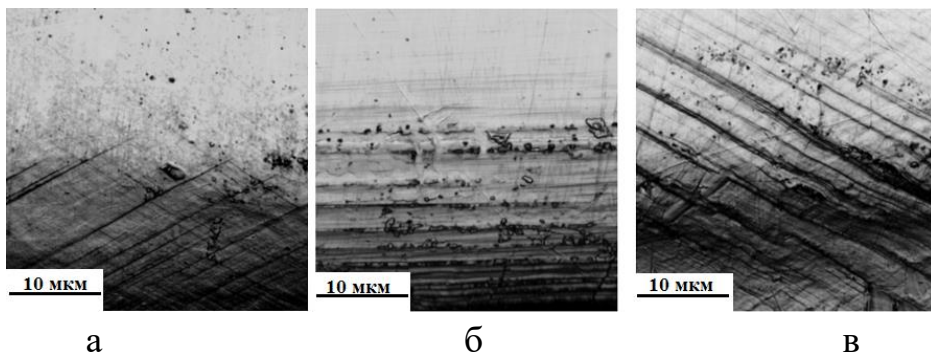


Рисунок 2 – Деформационный рельеф на гранях $(\bar{1}10)$ (а), (001) (б) и $(1\bar{1}0)$ (в) монокристалла стали Гадфильда с ориентацией оси нормальной нагрузки $[\bar{1}\bar{1}0]$ и трения $[001]$

При изменении ориентации силы трения происходит активизация дополнительных систем скольжения и сдвиг становится возможным в двух плоскостях (111) и $(11\bar{1})$ (таблица 1). Отношения напряжений двойникования к скольжению указывает на возрастание вероятности двойникования. Схемы плоскостей скольжения и направлений сдвига отражают изменение условий деформации и подтверждаются наблюдениями на картине деформационного рельефа.

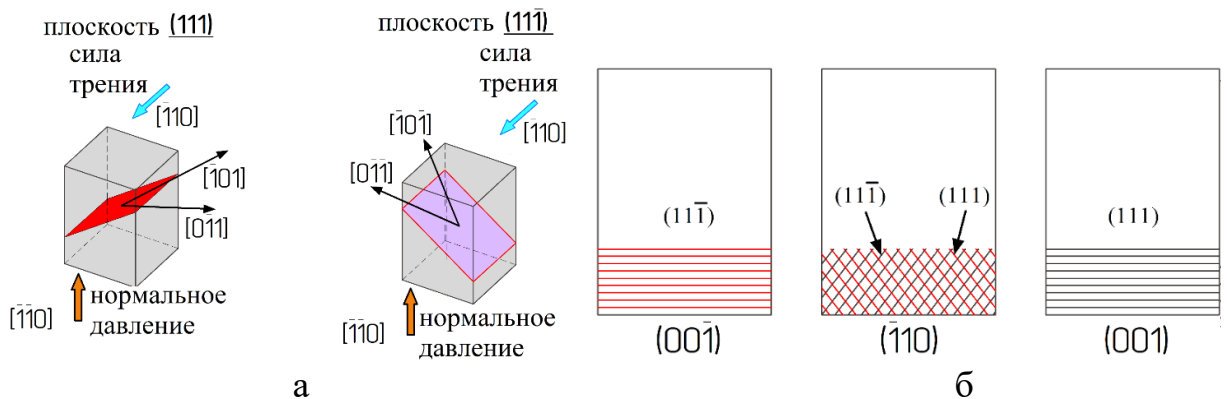


Рисунок 3 – Схемы возможных направлений сдвига и плоскостей скольжения (а) и схемы экспериментально ожидаемой картины следов сдвига (б) $[\bar{1}\bar{1}0] / [\bar{1}\bar{1}0]$ -монокристаллов стали Гадфильда

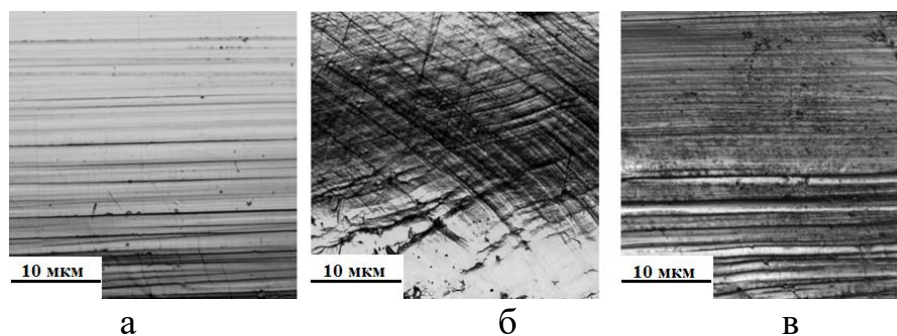


Рисунок 4 – Деформационный рельеф на гранях $(00\bar{1})$ (а), $(\bar{1}10)$ (б) и (001) (в) $[\bar{1}\bar{1}0] / [\bar{1}10]$ монокристаллов стали Гадфильда

В процессе экспериментальных исследований было установлено, что следы сдвига на гранях монокристаллов проявляются с некоторой закономерностью. Величина деформации в приповерхностном слое зависит от трех параметров: области, занятой следами скольжения (макроуровень); плотности следов скольжения, характеризующей степень развития деформации в мезообъеме; высоты ступенек сдвига, характеризующей деформацию в зоне сдвига и наиболее полно отражающей сопротивление сдвигу в результате субструктурного упрочнения (микрообъем). Совокупный анализ этих параметров, представленных на рисунке 5, позволил установить цикличность развития деформации и разрушения при трении монокристаллов. Развитие деформации сопровождается увеличением области, занятой следами скольжения и упрочнением, и характеризуется низким износом. По мере накопления дефектов создаются условия для образования поверхностных и приповерхностных микротрещин и разрушения. Это сопровождается увеличением износа и уменьшением области, занятой следами сдвига.

На основании полученных данных были выделены характерные стадии трения для монокристаллов стали Гадфильда (рисунок 6). *Первая стадия* – приработка – начинается с углов монокристаллов и образования локальных участков со следами полос скольжения, которые распространяются на небольшую высоту от поверхности трения. *Вторая стадия* – развитие деформации, которая фиксируется по параметрам рельефа, а также искривлению грани вблизи поверхности трения. *Третья стадия* – разрушение наиболее деформированного приповерхностного слоя, что приводит к уменьшению области распространения следов, которое сопровождается интенсивным износом и активным образованием большого количества частиц износа. При дальнейшем увеличении времени испытания наблюдается повторение второй и третьей стадий, характеризующих трение монокристаллов как процесс чередования циклов накопления деформации и разрушения материала.

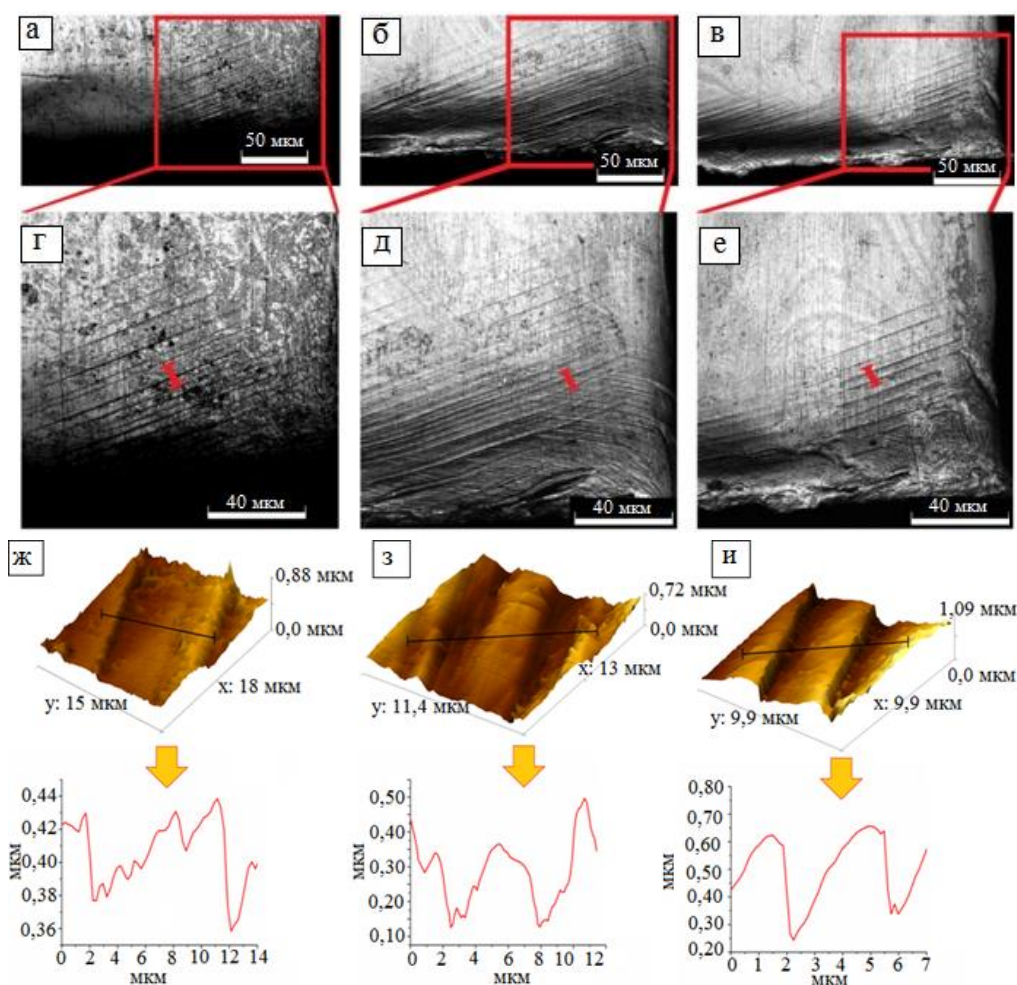


Рисунок 5 – Развитие систем скольжения и 3D-изображение полос скольжения на грани $(1\bar{3}8)$ в результате проведения трех испытаний: 1 (а, г, ж), 2 (б, д, з), 3 (в, е, и) на примере $[\bar{1}0\bar{7}1] / [3\bar{4}2]$ - монокристалла

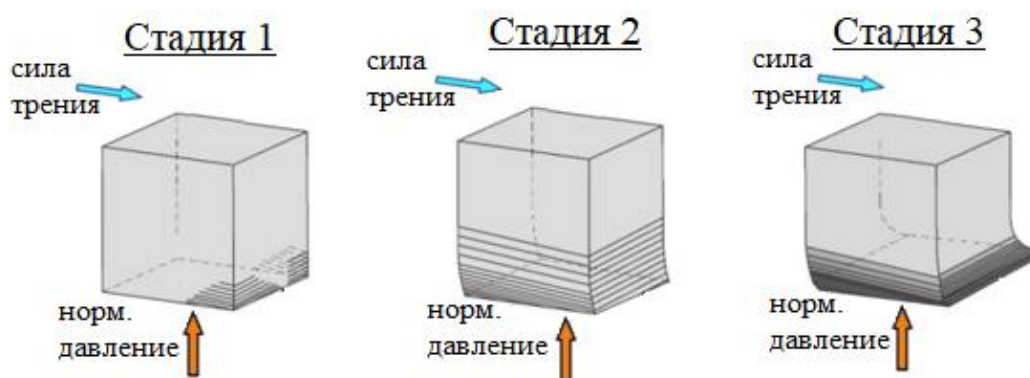


Рисунок 6 – Схематическое изображение эволюции деформационного рельефа

Полученные экспериментальные данные указывают на хорошую достоверность выполненных теоретически расчетов и возможность оценки развития деформационного рельефа с учетом ориентации действующих сил трения и нормального давления. Выявленные закономерности свидетельствуют, что преимущественной активизации скольжения или двойникования при сухом трении скольжения не происходит.

В четвертой главе впервые рассмотрены явления накопления разориентаций в сечении, как параллельном поверхности трения, так и перпендикулярном этой поверхности (рисунок 7). Рассмотренные выше (глава 3) деформационные процессы сопровождаются процессами переориентации на всех масштабных уровнях, которые проявляют свои индивидуальные особенности в зависимости от кристаллографической ориентации и схемы главных напряжений.

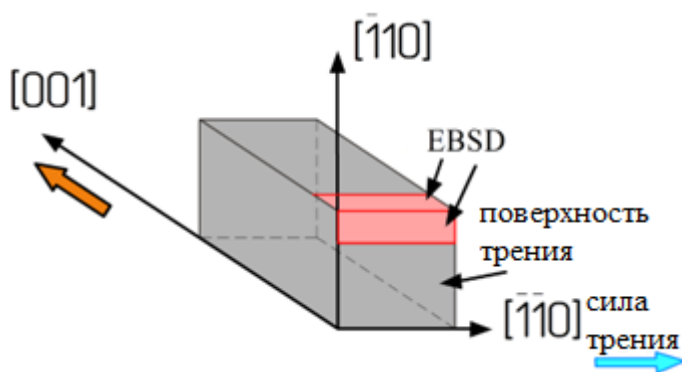


Рисунок 7 – Схема съемки $[001] / [\bar{1}\bar{1}0]$ -монокристаллов методом дифракции отраженных электронов

Поверхность грани условно разделена на три области с разной схемой главных напряжений (рисунок 8): I – преобладающего действия сжимающих напряжений, II – всестороннего неравномерного сжатия, III – преобладающего действия растяжения. На рисунке 9 показаны прямые и обратные полюсные фигуры для каждой выделенной области.

В области I, действия сжимающих напряжений, ориентация образца с направлением нагрузки силы нормального давления $[001]$ и трения $[\bar{1}\bar{1}0]$ не изменяется. Рассеивание точек на обратной полюсной фигуре минимальное. Область II претерпевает поворот вокруг оси $X1-[\bar{1}\bar{1}0]$ до 25° (рисунок 9, б), в результате которого образуются локально переориентированные мезообласти вблизи поверхности трения. Для области III наблюдается основное вращение вокруг другой перпендикулярной оси $Z1-[\bar{1}10]$. В этом случае на обратных полюсных фигурах наблюдается раздвоение (рисунок 9, в).

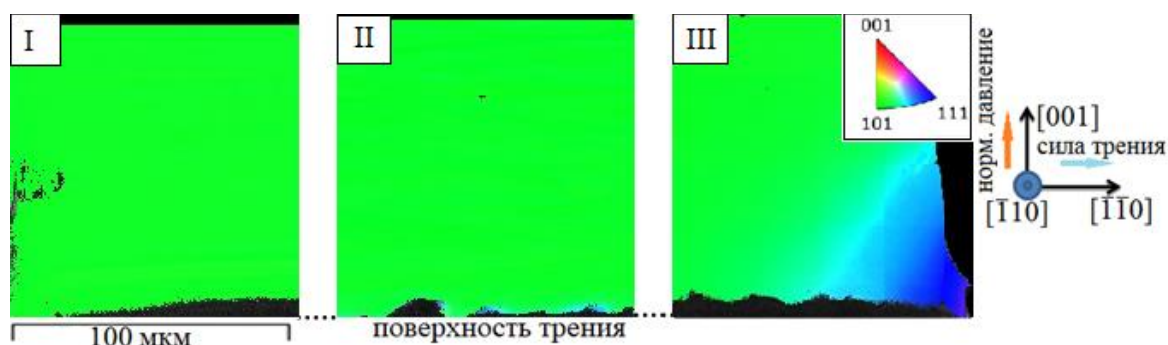


Рисунок 8 – Карта кристаллографической ориентации боковой грани вблизи поверхности трения $[001] / [\bar{1}\bar{1}0]$ -монокристаллов

Изменение ориентации в направлении «А» соответствует локальной переориентации в сторону полюса $\langle 111 \rangle$. Это достигается поворотом вокруг $Z1-[\bar{1}\bar{1}0]$. Изменение ориентации в направлении «Б» соответствует

переориентации в сторону полюса $\langle 112 \rangle$. В этом случае появляется составляющая разворота вокруг $X1$ - $[\bar{1}\bar{1}0]$ (рисунок 9, в).

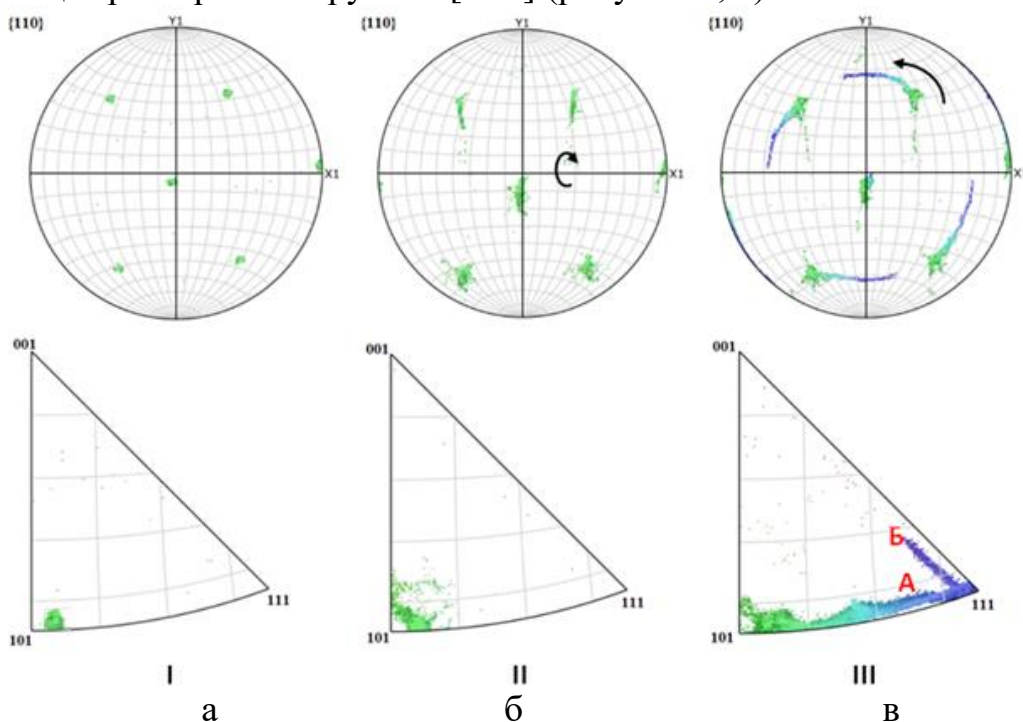


Рисунок 9 – Прямые и обратные полюсные фигуры $[001] / [\bar{1}\bar{1}0]$ - монокристалла для областей I (а), II (б), III (в)

Изучение поверхности трения с помощью EBSD метода дает информацию о ее переориентации в процессе трения. На рисунке 10 приведена EBSD-карта поверхности трения для $[\bar{1}\bar{1}0] / [001]$ - монокристалла. Изменение кристаллографической ориентации областей на поверхности трения и вблизи нее приводит к изменению в них условий деформации (рисунок 11).

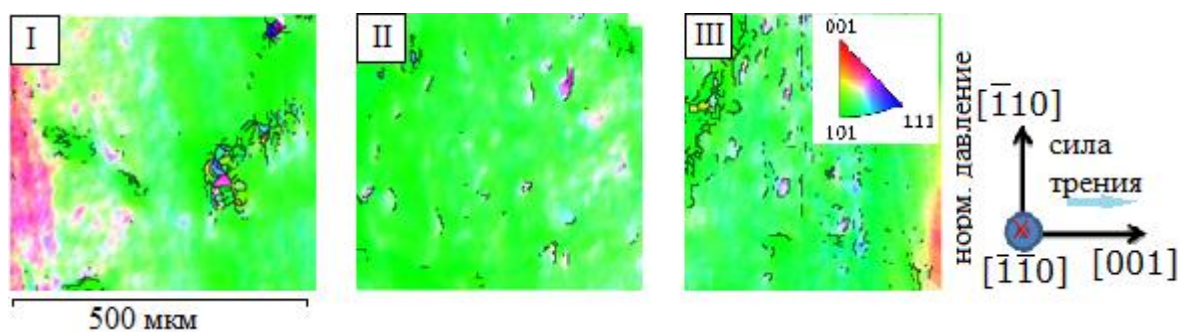


Рисунок 10 – Карта кристаллографической ориентации поверхности трения $[\bar{1}\bar{1}0] / [001]$ - монокристалла

Повороты относительно действующих сил трения и нормального давления могут привести к изменению действующего механизма деформации – скольжения и/или двойникования для каждой области. Эти данные позволяют провести пересчет наиболее активных систем скольжения и двойникования (таблица 2), который выявил, что при переориентации наиболее активно деформация идет скольжением. Эксперименты позволили выявить роль схемы

главных напряжений вблизи поверхности трения на закономерности переориентировки и деформации на макро- и мезоуровнях.

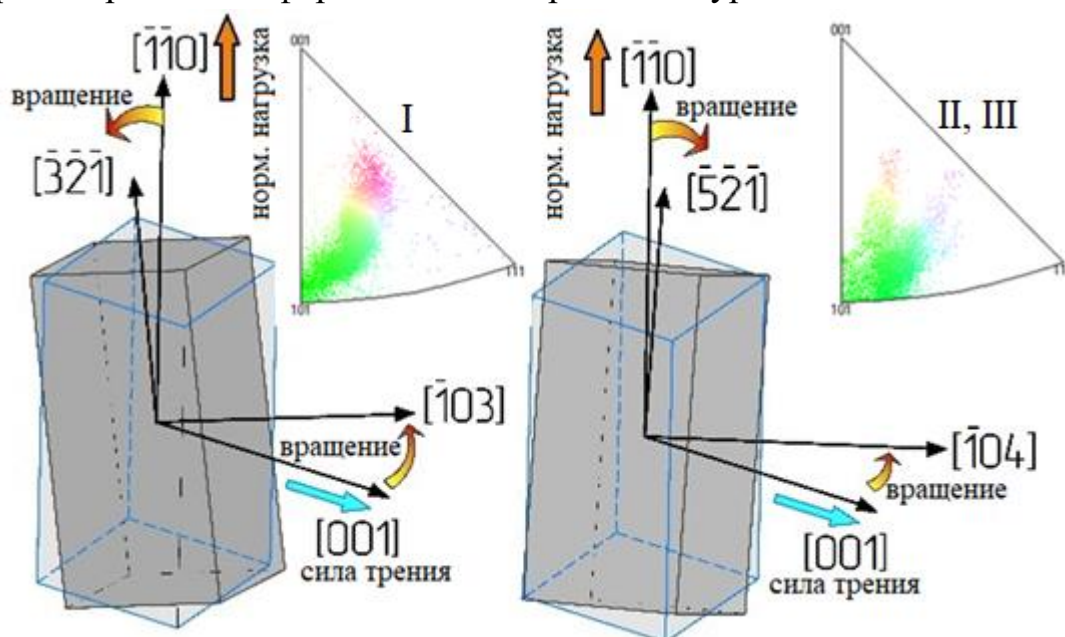


Рисунок 11 – Схема переориентации вблизи поверхности трения монокристалла с начальной кристаллографической ориентацией оси нормальной нагрузки $[\bar{1}\bar{1}0]$ и оси трения $[001]$

Таблица 2 – Максимальные номинальные напряжения, действующие после переориентации областей в направлениях $[\bar{3}\bar{2}\bar{1}]$ и $[\bar{5}\bar{2}\bar{1}]$

Плоскость сдвига	Плотно-упакованное направление	Суммарное напряжение скольжения ($\tau_{ск}$, МПа)	Вектор Бюргерса частичной дислокации	Суммарное напряжение двойникования ($\tau_{дв}$, МПа)	Отношение напряжения двойникования к скольжению ($\tau_{дв} / \tau_{ск}$)
Область I: ось трения $[\bar{1}03]$, нормальная нагрузка $[\bar{3}\bar{2}\bar{1}]$					
(111)	$[\bar{1}01]$	0.9	$[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]$	0.84	0.93
Область II, III: ось трения $[\bar{1}04]$, нормальная нагрузка $[\bar{5}\bar{2}\bar{1}]$					
(11 $\bar{1}$)	[101]	1.16	$[\bar{1}\bar{2}1]$	0.56	0.48
(111)	$[\bar{1}01]$	1.07	$[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]$	0.92	0.86

Закономерности переориентировок на микро- и наноуровнях и изменение дислокационной структуры по мере приближения к поверхности трения (см. подпись под рисунком 12) исследованы методом просвечивающей электронной микроскопии. Рассчитанные вклады субструктур в напряжение течения по измеренным параметрам этих субструктур позволили установить, что наибольший вклад в упрочнение дает нанозеренная субструктура с нанодвойниками. Большое количество изгибных экстинкционных контуров в микрополосовой субструктуре свидетельствует о высоком уровне внутренних напряжений и благоприятных условиях для зарождения микротрещин.

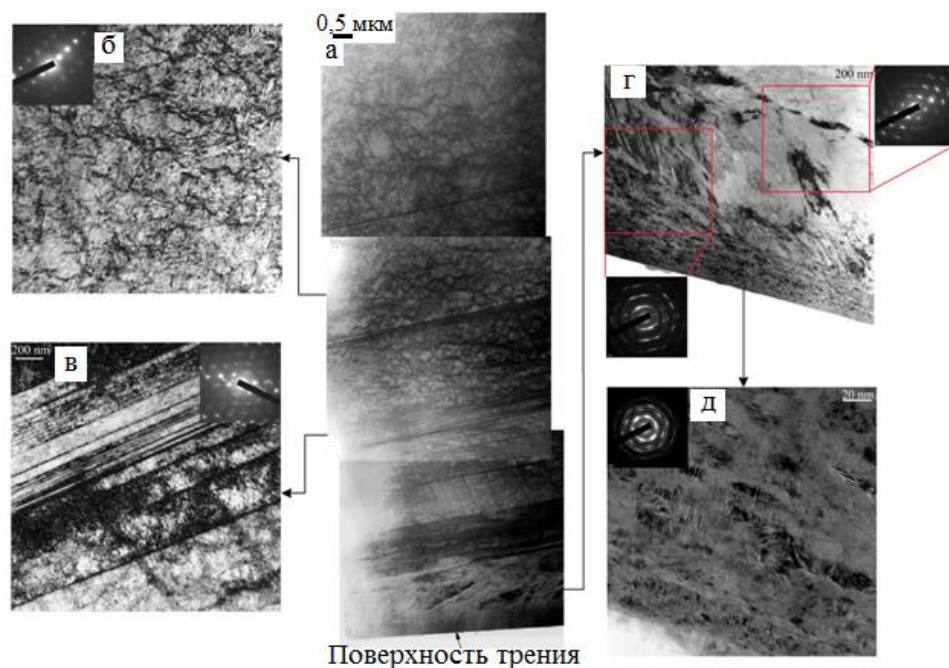


Рисунок 12 – Последовательность изменения дислокационной структуры по мере приближения к поверхности трения: общая панорама (а), дислокационная ячеистая субструктура (б), пачки микродвойников (в), микрополосовая, фрагментированная и нанополосовая (г), нанополосовая и нанозерна с нанодвойниками (д)

В пятой главе проведены исследования частиц износа и выполнен анализ характеристик процесса трения и износа монокристаллов исследуемых ориентаций.

Динамическое изменение коэффициента трения свидетельствует об особенностях характера трения, которое сопровождается так называемым эффектом stick-slip. Stick-slip эффект формируется за счет разрушения сильно деформированного приповерхностного слоя и отделения частиц износа. Изменение средней величины коэффициента трения имеет стохастический характер. Накопление повреждений в результате ударно-циклического взаимодействия трущихся поверхностей находят свое выражение в величине износа. Изменения величины износа является ориентационно чувствительными. Для [001] монокристаллов износ минимальный в течении первых циклов, что в целом делает эту ориентацию более износостойкой по сравнению с другими исследованными ориентациями (рисунок 13).

В процессе трения поверхностный слой образца деформируется с образованием тонкой деформационной структуры. После накопления некоторой деформации этот слой разрушается с отделением мелких оксидных и металлических частиц. Изучение строения, морфологии и распределения размеров частиц износа монокристаллов позволило условно разделить их на 3 типа: 1 – мелкие оксидные (часто образуют конгломераты), 2 – частицы, образованные в результате разрушения отслоившихся частиц разрушающейся контактной поверхности, 3 – крупные бесформенные частицы.

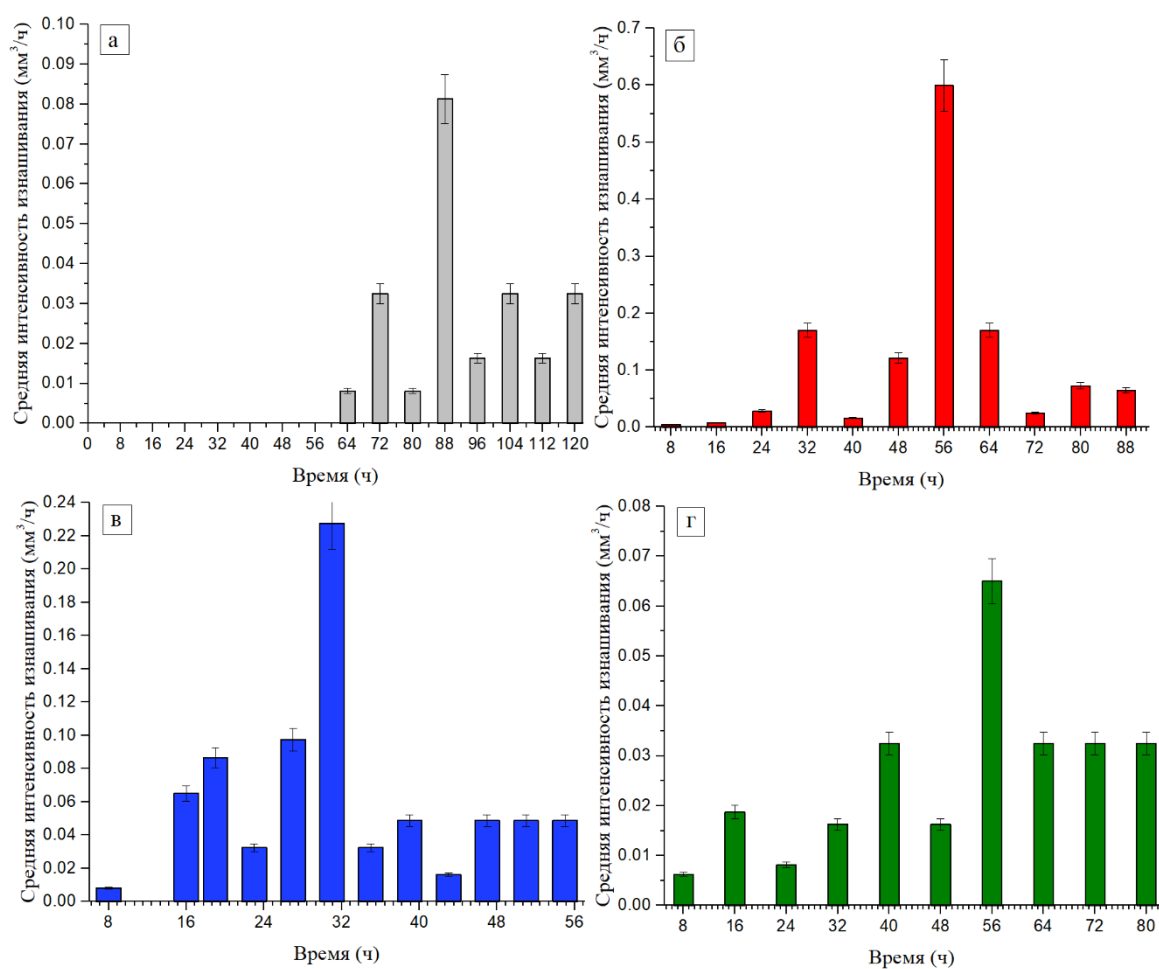


Рисунок 13 – Изменение интенсивности изнашивания за цикл испытания от времени испытания для монокристаллов: [001] / [1̄1̄0] (а), [111] / [21̄1̄] (б), [1̄1̄0] / [001] (в) и [1̄1̄0] / [1̄10] (г)

Мелкие частицы оксидов способствуют снижению коэффициента трения, крупные осуществляют абразивный износ поверхности, разрушение тонкого нанозеренного слоя и определяют основное сопротивление в процессе трения. Накопление дефектов в приповерхностном слое, его упрочнение, разрушение и повторное упрочнение определяет цикличность процесса трения. При ударно-циклическом характере накопления повреждений и с учетом схемы неоднородного напряженного состояния в условиях сформировавшейся градиентной структуры процесс разрушения образцов происходит посредством реализации комбинации окислительного, адгезионного и абразивного механизмов износа. При этом происходит образование разномасштабных частиц износа.

В завершающей части диссертационного исследования представлена эмпирическая схема разрушения монокристаллов стали Гадфильда (рисунок 14). Износ в монокристаллах стали Гадфильда определяется последовательностью процессов деформации приповерхностного слоя, формированием поверхностного нанослоя, адгезионным износом, окислительным износом, подготовкой к разрушению приповерхностной области образца и стохастическим процессом

абразивно-окислительного износа. В результате износа на разных этапах трения роль частиц износа будет оказывать разное влияние на коэффициент трения.

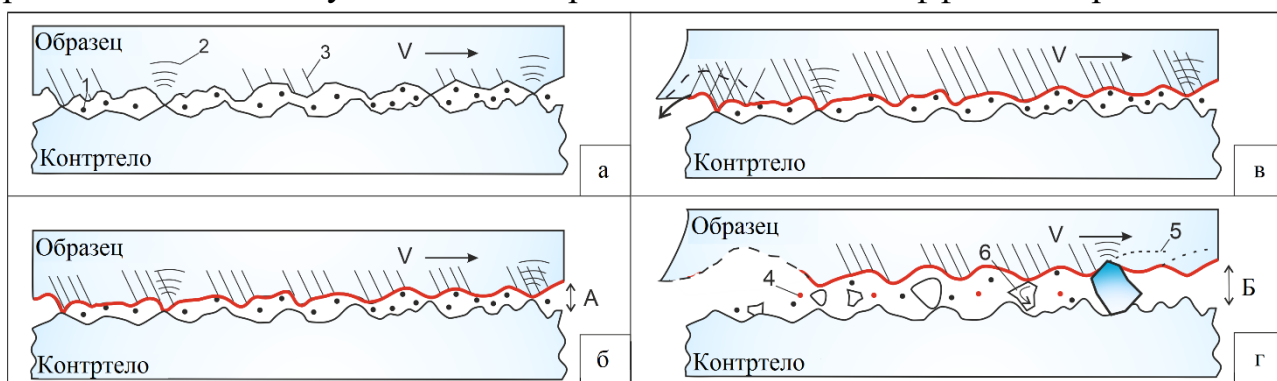


Рисунок 14 – Эмпирическая схема износа монокристаллов стали Гадфильда при сухом трении скольжения: 1 – частицы оксидов (частицы I типа), 2 – упругие волны, 3 – следы сдвига, 4 – частица III типа, 5 – след абразивного износа от частицы III типа, 6 – обкатываемая частица II типа

В приложениях приведены расчеты напряжений сдвига для монокристаллов исследуемых кристаллографических ориентаций при сухом трении скольжения и расчеты действующих напряжений скольжения и двойникования для отпечатков при микроиндентировании монокристаллов.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что учет силы трения при расчете отношения напряжения двойникования к скольжению ($\tau_{дв} / \tau_{ск}$) является близким для всех исследуемых ориентаций монокристаллов стали Гадфильда при испытаниях на трение скольжения для объема, где наблюдаются следы скольжения. Следовой анализ, проведенный для боковых поверхностей монокристаллов, свидетельствует о том, что действующие системы соответствуют рассчитанным наиболее нагруженным системам скольжения и двойникования.
2. Анализ плотности следов сдвига и высоты ступенек сдвига, а также области распространения деформации на боковых гранях монокристаллов свидетельствует об увеличении степени пластической деформации при приближении к поверхности трения и цикличности процессов упрочнения и разрушения при трении.
3. Установлено, что в монокристаллах стали Гадфильда в условиях сухого трения скольжения формируется градиентная структура. Высокий уровень упрочнения обеспечивают фрагментированная, микрополосовая субструктура с нанодвойниками. Максимальный уровень упрочнения обеспечивает поверхностный слой 0.5 мкм, образованный нанозернами с нанодвойниками.
4. Сухое трение скольжения монокристаллов стали Гадфильда происходит в условиях ударно-циклического накопления повреждений. Процесс износа реализуется посредством комбинации окислительного, адгезионного и

абразивного механизмов и сопровождается образованием разномасштабных частиц износа.

5. Кристаллографическая ориентация силы нормального давления и трения и локальный тензор напряжения при сухом трении монокристаллов стали Гадфильда определяют возможность деформации скольжением или двойникованием и переориентации на разных масштабных уровнях, влияя на продолжительность подготовки к разрушению и определяя тем самым интенсивность изнашивания.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Лычагин Д.В., Филиппов А.В., **Новицкая О.С.**, Колубаев А.В. Определение напряжения скольжения и двойникования при микроиндентировании монокристаллов стали Гадфильда // Письма о материалах. – 2020. – Т.10. – №4. – С. 451-456, <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-4-451-456>.

В зарубежных журналах, цитируемых Scopus и Web of Science

2. Lychagin D.V., Filippov A.V., **Novitskaya O.S.**, Kolubaev A.V., Moskvichev E.N., Fortuna S.V., Chumlyakov Y.I. Deformation and wear of Hadfield steel single crystals under dry sliding friction // Wear. – 2022. – Vol. 488-489. – P. 204126, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204126>.

3. Lychagin D.V., Filippov A.V., **Novitskaya O.S.**, Chumlyakov Y.I., Kolubaev E.A., Lychagina L.L. Deformation of Hadfield steel single crystals by dry sliding friction with the normal load/friction force orientations $[\bar{1}\bar{1}0]$ / $[\bar{1}10]$ and $[\bar{1}\bar{1}0]$ / $[001]$ // Tribology International. – 2020. – V. 147. – 106284, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106284>.

4. Lychagin D.V., Filippov A.V., Kolubaev E.A., **Novitskaia O.S.**, Chumlyakov Y.I., Kolubaev A.V. Dry Sliding of Hadfield Steel Single Crystal Oriented to Deformation by Slip and Twinning: Deformation, Wear, and Acoustic Emission Characterization // Tribology International. – 2018. – V. 119. – P. 1-18, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.10.027>.

5. Lychagin D.V., Filippov A.V., **Novitskaia O.S.**, Chumlyakov Y.I., Kolubaev E.A., Sizova O.V. Friction-induced slip band relief of Hadfield steel single crystal oriented for multiple slip deformation // Wear. – 2017. – V. 374-375. – P. 5-14, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.028>.