

ИНСТИТУТ МЕТАЛЛОФИЗИКИ  
АКАДЕМИЯ НАУК Украины

*На правах рукописи*

ЖУРАВЛЁВ Игорь Владиславович

УДК 531.44:620.186:539.21:537.531:535.3.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО И  
АТОМНОГО СТРОЕНИЯ ОКСИДОВ  
ЖЕЛЕЗА И НИКЕЛЯ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ  
ПРИ СУХОМ ТРЕНИИ

Специальность 01.04.07 - Физика твёрдого тела.

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

К и е в - 1 9 9 4



Работа выполнена в Институте металлофизики АН Украины.

Научный руководитель: академик АН Украины, профессор,  
доктор физико-математических наук *В. В. Немощкаленко*

Официальные оппоненты - доктор физико-математических  
наук, профессор *М. А. Васильев*  
(Киев)

- доктор физико-математических  
наук *И. Д. Щерба* (Львов)

Ведущая организация - Институт проблем материаловедения  
АН Украины (Киев)

Защита диссертации состоится "2" марта 1994 г.  
в 14<sup>00</sup> на заседании специализированного совета К 016.37.01  
в институте металлофизики АН Украины.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Института металлофизики АН Украины.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные  
печатью просим направлять по адресу: 252680, ГСП, г. Киев  
252142, проспект Вернадского, 36, Институт металлофизики  
АН Украины.

Автореферат разослан "2" февраля 1994 г.

Учёный секретарь  
специализированного совета К 016.37.01,  
доктор физико-математических наук

О. П. Федоров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Создание возможности научного прогнозирования поведения систем трения в условиях эксплуатации является актуальной практической задачей. Главный тормозящий фактор при решении этой задачи - отсутствие комплексного подхода к физическим процессам происходящим при трении как с точки зрения механики, так и с точки зрения химии. В литературе до настоящего времени мало сведений об особенностях физико-химических процессов протекающих в зоне контакта металлов при трении.

Подход к процессам трения с позиции классических представлений о механизмах пластической деформации, массопереноса и образования химических соединений часто оказывается малозффективным.

Рядом работ, в том числе выполненных в последние годы в Институте металлофизики АН УССР, показано, что механизмы указанных процессов в условиях фрикционных воздействий существенно отличаются от имеющих место в условиях традиционной термомеханической обработки металлов. Соответственно, природа и свойства образующихся при этих условиях в контактной зоне неравновесных или метастабильных структур могут существенно отличаться от обычных соединений элементов, находящихся в зоне контакта. Так, например, экспериментально установлено образование в зоне контакта металлов при трении своеобразных легированных кислородом сплавов (ЛКС) с концентрацией кислорода до 30 ат.%. Указанные ЛКС характеризуются отличным от известных оксидов характером межатомного взаимодействия металл-кислород.

Поэтому, представляет интерес изучение особенностей неравно-

весных структур получаемых при трении - уникальном способе синтеза новых материалов.

Цель работы. Настоящая работа ставит своей целью исследовать метастабильные соединения железа и никеля с кислородом, образующиеся при сухом трении, выяснить условия формирования, описать их атомное и электронное строение, объяснить особенности межатомного взаимодействия в исследуемых оксидах.

Научная новизна. Обнаружено образование наночастиц оксидов железа и никеля в процессе внешнего трения. Описана оригинальная модель формирования продуктов фрикционной обработки (ПФО), которые образуются при спекании в зоне контакта пары трения наночастиц оксидов железа и никеля и представляют собой нанокристаллический никельзамещенный вустит.

Получены оригинальные данные об электронном и атомном строении ПФО методами рентгеновской эмиссионной спектроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, ядерной гамма-резонансной и оже-спектроскопии, электронной просвечивающей микроскопии.

Проведены модельные расчеты электронного строения никельзамещенного вустита различного состава и его рентгеновских эмиссионных спектров, продемонстрировавшие хорошее соответствие экспериментальным результатам.

На основании экспериментальных и теоретических результатов объяснены особенности электронного строения и межатомной связи никельзамещенного вустита, формируемого при внешнем трении.

Практическая ценность. Результаты работы могут быть использованы при разработке новых триботехнических материалов и определении особенностей режимов их эксплуатации. Кроме триботехничес-

них задач, полученные данные могут использоваться для синтеза материалов при помощи фрикционной обработки. Исследования, проведенные в настоящей работе имеют методическую ценность при проведении анализа оксидов переходных 3d металлов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Электронное строение оксидов железа и никеля, синтезирующихся при фрикционной обработке, отличается от оксидов, получаемых термическим окислением, в частности, электронное строение атомов железа в продуктах сухого трения пары никель-Сталь 45 подобно его строению в четырехвалентных соединениях.

2. В зоне контакта металлов при сухом трении пары никель-Сталь 45 в результате высокоэнергетических импульсных воздействий происходит образование быстрогонакаленных частиц оксидов  $Ni_2O_3$  и  $FeO$  размером  $10 \pm 20$  нм.

3. Подобие электронной структуры нанокристаллического никельзамещенного вкстита ( $FeO$ ), формирующегося при фрикционной обработке, электронной структуре четырехвалентных соединений железа объясняется переносом электронной плотности с атомов  $Fe$  на атомы  $Ni$  при образовании связей  $Fe-Ni$ , что приводит к росту ионной компоненты межатомного взаимодействия  $Fe-O$ .

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались:

- на V Всесоюзном семинаре "Структурные аспекты локализации деформации и разрушения в кристаллах" (г. Юрмала 11 - 16 марта 1991 г.)

- на II Всесоюзном симпозиуме: Синергетика. Новые технологии получения и свойства металлических материалов (Москва 12 - 17 мая 1991 г.).

Объем работы. Диссертация изложена на 110 страницах, содержит 35 рисунков и 9 таблиц, состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы, включающего 102 наименования.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе, носящей обзорный характер, поднимается проблема формирования вторичных структур в процессе фрикционной обработки. Обсуждается, что в результате взаимодействия микровыступов контактирующих материалов при трении в пятнах фактического контакта благодаря интенсивной пластической деформации происходит импульсное выделение энергии. Это приводит к локальному разогреву материала, физико-химическим процессам взаимодействия с элементами рабочей среды трения с последующей быстрой закалкой.

Химическое взаимодействие металлов с окружающей средой при трении имеет ряд особенностей. Вследствие развивающихся в нем напряжений и деформации, а также высоких контактных температур, металл переходит в особое "активированное состояние".

Окисление - наиболее распространенный физико-химический фактор, играющий существенную роль в реальных процессах трения, так как кислород является активным элементом, содержащимся в большинстве рабочих сред и смазочно-охлаждающих жидкостей. Установлено, что оно происходит даже в вакууме, азоте и водороде высокой чистоты, что заставляет выделить проблему окисления металлов при трении в отдельный раздел.

Исследование электронной и атомной структуры, характера химического взаимодействия переходных металлов с кислородом, формирующихся на поверхностях пары трения, связано с определенными

трудностями. Во-первых, вторичные структуры образуются в узком поверхностном слое толщиной около 10 мкм. При высокой степени локализации пластической деформации, толщина данного слоя оказывается еще меньше. Во-вторых, вторичные структуры являются гетерогенными системами и выделение интересующих нас фаз часто не реально.

Поэтому, для решения этих задач необходим комплексный подход, включающий в себя сравнительный анализ спектральных особенностей ПФО и эталонов, а также структурные, металлографические методы исследования и математическое моделирование изучаемых соединений. Особое внимание уделено подбору эталонов оксидов переходных 3d металлов. Кроме эталонов равновесных оксидов, образующихся при термическом окислении, анализировались уникальные ЛКС железа и никеля содержащие до 30 ат. % кислорода, образующиеся при трении в водовоздушной среде.

Во второй главе описаны материалы, методики получения и анализа ПФО. В настоящей работе в качестве материала для исследований выбраны Сталь 45 (HV<sub>5</sub>203) и отожжённый электролитический никель (99.98%). Предварительным отжигом в вакууме при температуре 1000 °С в течении 6 часов достигался средний размер зерна никеля (HV<sub>5</sub>80) - 200 мкм.

Фрикционная обработка пары никель - Сталь 45 проводилась в условиях граничного трения на машине трения 2070-СМТ-1 по системе колодка (никель 99.98%) - ролик (Сталь 45) со скоростью трения - 3 м/с и нагрузкой 1,25 МПа. Сухое трение данной пары проводилось как после проведения приработки поверхностей в водовоздушной среде, так и без неё.

Несмотря на то, что в описанном случае происходит процесс фрикционной обработки разнородных материалов, формируемые в установленном режиме трения вторичные структуры на обеих поверхностях трибосопряжения имеют одинаковое строение. Кроме того, такое же строение имеют продукты износа, что было установлено на основании структурного и спектральных анализов. Благодаря этому, в зависимости от методики исследований, можно использовать образцы ПФО, находящиеся на той или иной поверхности. Необходимо отметить, что наиболее корректно отделение ПФО от матриц исходных материалов происходит при изнашивании ПФО, сформированных на предыдущих этапах. В этом случае внешнее воздействие при "снятии" пленки ПФО происходит в условиях ее генерации и не разрушает данные объекты.

Для решения поставленных задач использовались метод дифракционной электронной микроскопии в сочетании со сканирующей просвечивающей электронной микроскопией и энергетической дисперсионной рентгеновской эмиссионной спектроскопией на электронном микроскопе JEM-2000XII фирмы JEOL (Япония), снабженным энергетическим дисперсионным рентгеновским спектрометром AN10000/95S и детектором LZ5 с ультратонким окном, позволяющим анализировать легкие элементы.

Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре ДРОН-2.0М с использованием  $FeK\alpha_{1,2}$  - излучения, с длиной волны  $K\alpha_1$ -1.93597 нм и  $K\alpha_2$ -1.93991 нм.

Микромеханические испытания проводились на приборах УПМ-11 и ПМТ-3. Микротвердости Hh и Hd рассчитывались соответственно по глубине и диагонали остаточного отпечатка при нагрузке 0.5 Н при

глубине внедрения индентора 2 мкм. Работы упругой ( $A_u$ ) и упруго-пластической ( $A$ ) деформации материалов определялись по площадям под кривыми разгрузки и нагружения при внедрении индентора.

Состав измерялся на рентгеновском микроанализаторе MS-46 фирмы "Самеса" (Франция). Суммарная погрешность в определении концентраций металлических компонент не превышала 0.5 % по массе. Наиболее точно содержание легкого элемента - кислорода определялось, как дополнение к 100%.

Измерение спектров проводилось на установке LAS-2000 при энергии первичного пучка электронов 3 КэВ, диаметре зонда 5 мкм.

Рентгеновские фотоэлектронные спектры образцов порошков продуктов износа получены с использованием электронного спектрометра IEE-15 фирмы "Varian". Фотоэлектроны возбуждались К - излучением алюминиевого анода.

Рентгеновские эмиссионные спектры  $K\alpha$  кислорода и  $L\alpha$  - металлов получены на вакуумном ( $10^{-3}+10^{-4}$  Па) спектрометре САФ-1. В качестве детектора использовался аргон-метановый счетчик, работающий в пропорциональном режиме. Монохроматором служила изогнутая пластина кристалла RbAP ( $2d = 2.6136$  нм).

$K\beta_{2,5}$ - полосы переходных 3d металлов получены на спектрографе ДРС-2М. В качестве кристалла анализатора использовали кварц ( $1340$ ) в первом порядке отражения. Глубина выхода излучения составляла ~30 мкм, что позволяло характеризовать объем материала, а не поверхность, которая может изменяться в процессе эксперимента.

Съемка ядерных гамма-резонансных спектров поглощения проводилась на установке NP-255 в режиме постоянных ускорений относительно нитропрусида натрия.

Неспинполяризованный расчет электронной структуры модельных кластеров оксидов проводился нерелятивистским методом  $X\alpha$  рассеянных волн. Для сопоставления экспериментальных данных с теоретическими расчетами модельных кластеров рассчитывались рентгеновские эмиссионные спектры модельных кластеров.

В третьей главе обсуждается вопрос формирования содержащих кислород ПФО при сухом трении. Показано, что физико-механические характеристики поверхности трибосопряжения определяют условия синтеза вторичных структур при фрикционной обработке. В свою очередь, физико-механические характеристики вторичных структур, сформированных на предыдущем этапе, определяют условия синтеза на следующем этапе фрикционной обработки. Переход процесса трения к установившемуся режиму означает, в частности, что физико-механические свойства формируемых структур и соединений определяют, наряду с внешними условиями (скорость, нагрузка, среда), необходимый для их образования режим энерговыделения. По мере износа вторичных структур происходит их автогенерация.

Физико-механические характеристики исходных и пластически деформированных металлов (таблица 1) при сухом трении без предварительной приработки в водовоздушной среде не могут создать условия необходимые для образования самовостанавливающегося в дальнейшем слоя ПФО и процесс сухого трения приводит к заеданию.

Благодаря приработке в водовоздушной среде происходит формирование тонких слоев ( $\sim 5-10 \mu\text{м}$ ) легированных кислородом сплавов, обладающих более высокими физико-механическими характеристиками (таблица 1).

ТАБЛИЦА 1.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
 КОНТАКТИРУЮЩИХ ПРИ ТРЕНИИ МАТЕРИАЛОВ

Физико-механические свойства	никель исходный	никель пл. деф.	Сталь 45 исходная	Сталь 45 пл. деф.	ЛКС	ПФО
H(d) ГПа $\pm 10\%$	1.9	2.2	2.2	2.4	4.0	6.3
H(h) ГПа $\pm 10\%$	1.8	2.0	2.0	2.3	4.0	6.0
Аупр./А $\pm 20\%$	0.05	0.06	0.07	0.09	0.18	0.23

В этом случае локализация пластической деформации выше, и режим энерговыделения во время контакта микровыступов при дальнейшем сухом трении приводит к образованию ПФО, содержащих 48 + 51 ат.% кислорода, 28 + 38 ат.% железа и 11 + 22 ат.% никеля. Износ при дальнейшем сухом трении превышает начальную толщину слоя ЛКС и они не обнаруживаются под слоем ПФО, а только создают необходимые начальные параметры для синтеза ПФО. В дальнейшем путь сухого трения в установившемся режиме превышает 800 км и происходит автогенерация ПФО.

Исходя из данных таблицы 1 можно качественно охарактеризовать данный автогенератор как работающий "в жестком режиме возбуждения" и оценить область устойчивости его к начальным физико-механическим характеристикам поверхностей трибосопряжения.

Четвертая глава посвящена спектральным исследованиям ПЮ, полученных при сухом трении после приработки в водовоздушной среде.

На основании сравнения соотношения интенсивностей и индексов асимметрии оже-пиков LMM серии 3d металлов, а также сравнения формы наиболее чувствительного к изменению химического состояния атома MVV пика удалось установить, что ПЮ отличаются от известных эталонов оксидов железа и никеля. Расщепление в ПЮ MVV пика железа с энергией 46 эВ на два с энергиями 43 и 51 эВ, происходящее из-за окисления, превышает расщепление в известных оксидах, что свидетельствует о невозможности интерпретации данного спектра как суперпозиции эталонных оксидов.

Пик фотоэлектронного спектра, соответствующий  $Fe2p_{3/2}$  линии, в ПЮ относительно эталонов оксидов смещён в область более высоких энергий и находится при энергии 712.8 эВ, что соответствует соединению железа со степенью окисления большей, чем +3.

Наиболее чувствительной к характеру межатомного взаимодействия является рентгеновская эмиссионная  $K\beta_{2,5}$  полоса 3d металлов. В ряду оксидов железа (таблица 2) по мере увеличения степени окисления металла происходит пропорциональное изменение параметров основного пика. Сопоставляя положение главного максимума спектра ПЮ с эталонами, можно сделать вывод, что исследуемый спектр практически совпадает с  $FeK\beta_{2,5}$  - полосой в соединении  $BaFeO_3$ , в котором степень окисления железа +4.

Максимум  $K\beta_{2,5}$  полосы Ni полученной от ПЮ смещён в более длинноволновую часть спектра по сравнению с никелем, железо-никелевым сплавом и оксидом никеля NiO, что доказывает несостоятель-

ность объяснения спектра ПФО, как суперпозиции спектров перечисленных выше соединений.

ТАБЛИЦА 2.

ПАРАМЕТРЫ  $FeK\beta_{2,5}$  СПЕКТРОВ ОКСИДОВ

оксид	FeO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	ПФО	BaFeO <sub>3</sub>	ошибка
Emax (эВ)	7103.5	7104.7	7105.5	7106.4	7107.4	7107.1	±0.3
ширина (эВ)	10.2	10.6	9.5	11.5	7.8	7.3	±0.3

Аналогичная информация получена при исследовании рентгеновских эмиссионных  $K\alpha$  линии кислорода,  $L\alpha$  линии железа и никеля, отношения  $\int L\alpha / \int L_1$  интегральных интенсивностей рентгеновских эмиссионных  $L\alpha$  и  $L_1$  линий железа, а также ядерных гамма-резонансных (Мёссбауэровских) спектров ПФО.

В пятой главе рассматривается атомное строение ПФО. На рентгенодифрактограмме ПФО содержится наплыв, характерный для рентгеноаморфной фазы, а также слабые рефлексы ГЦК решетки твердого раствора замещения железа в никеле с параметром решетки 0.358 нм и рефлексы оксида никеля NiO с решеткой типа NaCl (параметр решетки 0.420 нм).

Необходимо отметить, что особенности спектров ПФО, описанные в четвертой главе, нельзя рассматривать, как суперпозицию спектров оксида никеля NiO и твердого раствора замещения железа в никеле. Поэтому, спектры гетерогенных ПФО, в основном, характеризуют именно рентгеноаморфную фазу.

Порошки продуктов износа являются достаточно мелкодисперсными образцами ПФО, отделенными от матриц исходных материалов и их электронная просвечивающая микроскопия оказалась возможной без предварительного утонения.

Электронная просвечивающая микроскопия позволила обнаружить две группы частиц порошков ПФО. К первой группе относятся частицы размером  $10 \pm 20$  нм. Данные частицы являются кристаллами и, несмотря на малые размеры, содержат по одному или несколько дефектов: двойников. Среди них обнаружены оксид никеля  $Ni_2O_3$  и оксид железа  $FeO$ .

Оксид  $Ni_2O_3$  является неустойчивым, искусственно синтезируемым соединением и его существование в продуктах износа представляет особый интерес.

Ко второй группе относятся нанокристаллические частицы размером несколько микрон с решеткой типа  $NaCl$ . Параметр решетки составляет  $0.425$  нм и близок параметрам решеток  $FeO$  ( $a=0.431+0.513$  нм) и  $NiO$  ( $0.419$  нм). На кольцевых рефлексах присутствуют и более интенсивные точечные рефлексы.

На электронно-микроскопическом изображении данных частиц видно, что они являются конгломератами, сформированными при слипании наночастиц первой группы. Подобное слипание происходит из-за огромной удельной поверхностной энергии наночастиц.

Из рентгеновских эмиссионных спектров, полученных с различных участков (размером менее  $10$  нм) данных частиц непосредственно в колоне электронного микроскопа следует, что в состав каждого участка этих ПФО входит все три элемента: и железо, и никель, и кислород. Поэтому, изучаемую фазу следует интерпретировать как

железозамещенный оксид NiO (никельзамещенный вксит).

В системе железо-никель-кислород стабильным оксидом формирующимся при термическом окислении является оксид  $NiFe_2O_4$  с решеткой типа шпинели. Интересно, что при трении он не формируется, что отражает особенность этого процесса в сравнении с термическим окислением.

Необходимо обратить внимание, что рефлексы  $Ni_2O_3$  в этих частицах не были обнаружены, что свидетельствует о фазовых превращениях, происходящих при слипании наночастиц в данные конгломераты.

Полученные результаты позволяют сформулировать оригинальную модель, описывающую физические процессы формирования вторичных структур при фрикционной обработке. Процесс формирования вторичных структур включает в себя: формирование в пятнах фактического контакта - наночастиц порошков продуктов износа; затем, данные частицы из-за высокой поверхностной энергии слипаются в конгломераты размером ~10 мкм, при этом в них протекают фазовые превращения и выделяется дополнительная энергия; в дальнейшем, часть полученных продуктов износа остаётся на поверхностях трибосоприжения, где происходит их прокатка. Именно они представляют собой вторичные структуры участвующие в процессе трения на следующих этапах. Формирование на промежуточных стадиях фрикционной обработки наночастиц может объяснить образование мостиков сварки при трении и процесса сварки в результате фрикционной обработки.

Разделять ПФО на 2 различных оксида NiO и FeO нельзя, из-за того, что (согласно измерениям спектров рентгеновской эмиссии непосредственно в колонне электронного микроскопа) в нанобъёмах размером менее 10 нм присутствуют оба переходных металла.

Попытки объяснить изменения спектров ПФО по сравнению с указанными оксидами, переносом заряда с NiO на FeO благодаря контактной разности потенциалов и рассмотрение заряженных кластеров  $FeO^+$  и  $NiO^-$  качественно могут объяснить наблюдаемые эффекты, но не корректны из-за того, что размеры частиц оксидов меньше величины двойного электрического слоя. Корректное объяснение экспериментальных результатов не на микро, а на наноуровне потребовало проведения расчетов электронной структуры нанокристаллического никельзамещенного вюстита.

В шестой главе при помощи модельных кластерных расчетов проведено моделирование электронной структуры ПФО методом  $X\alpha$  рассеянных волн. Были рассчитаны кластеры никельзамещенного вюстита  $Fe_4O_4$ ,  $Fe_3NiO_4$ ,  $Fe_2Ni_2O_4$ ,  $FeNi_3O_4$  и  $Ni_4O_4$ . Соотношение металл-кислород выбрано 1:1 в связи с тем, что ПФО содержат около 50 ат. % кислорода.

На основании полученных результатов расчета были воссозданы рентгеновские эмиссионные K - спектры атомов кластеров.

Необходимо отметить значительное коротковолновое смещение рентгеновской эмиссионной  $K\beta_2$  полосы железа в кластере при повышении концентрации никеля, и длинноволновое смещение  $K\beta_2$  полосы никеля при увеличении концентрации железа. Это хорошо согласуется с приведенными выше экспериментальными результатами и свидетельствует о правильности теоретической модели.

По результатам расчетов составлена таблица 3. В ней показано перераспределение заряда 3d электронных плотностей в *maffin tin* сферах атомов железа и никеля в кластерах.

ТАБЛИЦА 3.

## ЗАРЯД 3d ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ АТОМОВ МЕТАЛЛОВ

КЛАСТЕР	Fe <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> NiO <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> Ni <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	FeNi <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Ni <sub>4</sub> O <sub>4</sub>
Fe 3d	6.202	6.157	6.167	6.138	-
Ni 3d	-	8.275	8.266	8.253	8.240

Из таблицы 3 следует, что по мере увеличения содержания никеля в кластере никельзамещенного вюстита наблюдается перенос электронной плотности с *maffin tin* сфер атомов железа на *maffin tin* сферы атомов никеля.

## ВЫВОДЫ

1. В процессе сухого внешнего трения пары никель-Сталь 45 в результате ударов взаимодействующих микровыступов обнаружено формирование наночастиц оксида никеля Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, который является неустойчивым искусственно синтезируемым соединением и имеет гексагональную решетку с параметрами  $a = 0.461$  нм,  $c = 0.561$  нм, а также наночастиц FeO с решеткой типа NaCl.

2. Благодаря высоким скоростям охлаждения ( $10^6 + 10^7$  К/сек) получаемые при трении наночастицы, несмотря на размер  $10 + 20$  нм содержат одну или несколько плоскостей двойникования.

3. При спекании (сваривании, слипании) наночастиц оксидов никеля и железа происходят структурно-фазовые превращения и формируются продукты износа представляющие собой частицы размером до

10 мкм неправильной формы. Находясь на поверхностях трибосопряжения, эти частицы представляют собой ПФО.

4. Электронное строение атомов железа в ПФО отличается от оксидов, получаемых термическим окислением и подобно электронному строению атомов железа в его четырехвалентных соединениях.

5. Порошки продуктов износа, а следовательно и ПФО являются нанокристаллическим железозамещенным оксидом никеля NiO (никельзамещенным вюститом) с решеткой типа NaCl.

6. Модельный кластерный расчет показал, что при увеличении концентрации никеля в Ni замещенном оксиде FeO (решетка типа NaCl) наблюдается увеличение ионной компоненты межатомного взаимодействия Fe-O. При этом интенсивность взаимодействия O-Ni уменьшается сравнительно с оксидом NiO (решетка типа NaCl). Взаимодействие Fe-Ni приводит к переносу заряда с атомов железа на атомы никели, что обуславливает эти особенности электронного строения ПФО.

7. Получаемые в установившемся режиме сухого трения продукты фрикционной обработки формируются при трении не исходных металлов, а образующихся на этапе приработки в водовоздушной среде тонких слоев легированных кислородом сплавов.

8. При генерации ПФО, ЛКС играют роль матрицы пары трения только на начальном этапе: способствуют более высокой, чем при сухом трении исходных металлов, локализации пластической деформации. Это приводит к росту энерговыделения в пятнах фактического контакта материалов, что создает предпосылки для синтеза самовосстанавливающегося в дальнейшем покрытия ПФО.

9. При рассмотрении фрикционной обработки с точки зрения ав-

тогенерации вторичных структур необходимо учитывать особенности жёсткого режима возбуждения описываемого автогенератора.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

Особенности взаимодействия кислорода с металлами в быстрозакаленном сплаве Fe-Ni-O / Немошкаленко В.В., Чубенко А.Н., Журавлёв И. В. / Металлофизика. 1993. т.15, N1. с.88-91.

Соединение четырехвалентного железа в продуктах фрикционного взаимодействия никель-Сталь 45 / Немошкаленко В.В., Швадский Ю.Ф., Журавлёв И.В./Металлофизика. 1994. т.16, N1. с.89-92.

Особенности электронной структуры железа в продуктах фрикционного взаимодействия никель-Сталь 45/ Немошкаленко В.В., Чубенко А.Н., Журавлёв И.В./Металлофизика. 1993. т.15, N2. с. 57-60.

Подписано в печать 7.02.94г Формат 60x84/16

Бумага писчая. Усл.печ.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №250

Отпечатано ЦУОП ГНПП "Плодвинконсерв" г. Киев, Саксаганьского

ЛНБ ім. В. Стефайка  
АН України

AB 29.337