

УДК 538.9

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ НИКЕЛЯ

С.В. Короткевич¹, В.В. Свиридова²

¹РУП «Гомельэнерго»

²Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

ANALYSIS OF DEFORMATION PROCESSES IN SURFACE NICKEL LAYER

S.V. Korotkevich¹, V.V. Sviridova²

¹RUE "Gomelenergo"

²F. Scorina Gomel State University

На основании принципа наименьшего действия предложены инварианты для описания процессов формирования и эволюции структуры поверхности раздела металлов при внешних воздействиях. Данные инварианты могут быть использованы, в том числе, и при создании и разрушении наноматериалов.

Ключевые слова: *нано, субмикро, микро, мезо и макроуровни деформации, равновесная и неравновесная деформация, инварианты.*

On the basis of the principle of least action, invariants are proposed for describing the processes of formation and evolution of the structure of the interface between metals under external influences. These invariants can be used, among other things, in the creation and destruction of nanomaterials.

Keywords: *nano, submicro, micro, meso and macrolevels of deformation, equilibrium and nonequilibrium deformation, invariants.*

Введение

Механизмы упрочнения и разрушения поверхностного слоя металлов, а также условия его самоорганизации при равновесной деформации хорошо изучена [1], [2], чего нельзя сказать о самоорганизации процессов при неравновесной деформации в условиях фазовой нестабильности кристаллической решётки [3]. В соответствии с нелинейной механикой и мезомеханикой пластическое течение в нагруженном твёрдом теле является многоуровневым процессом и связано с потерей сдвиговой устойчивости на нано, микро, мезо и макромасштабных уровнях [4]. Интенсивность внешнего воздействия определяет структуру, свойства и механизмы разрушения поверхностных слоёв металлов. Физика процессов, протекающих на поверхности металла при многоцикловом, малоамплитудном и знакопеременном трибонагружении, описана в работах [5]–[8]. Установлены механизмы формирования элементов дефектной структуры для каждого из структурных уровней деформации (нано, микро, мезо и макро) поверхностного слоя никеля при многоцикловой малоамплитудной и знакопеременной деформации, где высокая плотность дислокаций и локальный градиент ориентации структурных элементов в кристаллической решётке никеля играет фундаментальную роль на каждом из масштабных уровней деформации. С использованием различных модельных представлений, а именно, экстинкционных контуров, локальной кривизны кристаллической решётки никеля и дислокационных вкладов в механизмы упрочнения

осуществлена количественная оценка величин внутренних напряжений и параметров дефектной структуры поверхностного слоя никеля – в условиях его фазовой нестабильности, где величина внутренних напряжений сопоставима и превышает величину модуля упругости никеля $\approx 2 \cdot 10^{11}$ Па. В литературных источниках ограничены данные о таких высоко диспергированных материалах и их физико-химических свойствах [4], [5]. Общепринятая точка зрения, что формирование нанобъектов происходит при высокоэнергетическом воздействии или интенсивной пластической деформации и / или равноканальном угловом пресовании в направлении сверху вниз, когда в результате внешнего воздействия при контактных давлениях в ГПа имеет место фрагментация материала от макро, мезо, микро до наномасштаба [5]. Данные о формировании наноструктур при контактных давлениях $\approx 0,1 \div 0,2$ кПа в присутствии поверхностно-активных веществ в условиях неравновесной деформации крайне ограничены.

Остаётся открытым вопрос об установлении механизмов и доминирующих факторов, определяющих физико-химические и механические свойства (аморфность, сверхпластичность, каталитическую активность и др.) поверхности раздела металлов в условиях неравновесной деформации. Определение основных закономерностей в области равновесной и неравновесной деформации является актуальной проблемой при создании наноматериалов с уникальными свойствами.

Целью настоящей работы является изучение механизмов пластической деформации на различных структурно-масштабных уровнях в условиях фазовой нестабильности поверхностного слоя никеля при трибонагрузке и определение основных закономерностей, описывающих кинетику упрочнения и разрушения поверхностного слоя металлов.

1 Методика эксперимента

Исследовался поликристаллический никель чистотой 99,99%. Образцы в виде тонких дисков полировались электролитически и отжигались в вакууме 0,133 мПа при 973 К. Испытание на трение пары Ni – Mo проводилось на машине АЕ-5 с точной установкой площади контактирования при удельной нагрузке ≈ 84 кПа и линейной скорости $\approx 0,5$ м/с. Правильное использование нагрузочно-скоростных параметров или верное применение масштабного фактора наряду с высокой чувствительностью метода ферромагнитного резонанса (ФМР) к структурным изменениям в тонком поверхностном слое толщиной $\approx 0,01 \div 1$ мкм позволило увидеть при анализе экспериментальных данных осциллирующую кинетику изменения плотности дислокаций и интенсивности изнашивания, что позволило грамотно интерпретировать полученные результаты, которые хорошо согласуются с результатами работы [5]. Электронно-микроскопические исследования никеля осуществлялись на микроскопе ЭВМ-100АК и Hitachi-N800 методом тонких фольг на «просвет». Разрешение Hitachi N-800 составляет $\approx 0,1$ нм. После испытания на трение фольги подвергались одностороннему электролитическому утонению с противоположной стороны от поверхности трения, что позволило исследовать приповерхностный объем, примыкающий к поверхности трения. Методика препарирования образцов никеля для просвечивающей электронной микроскопии приведена в работе [2].

2 Результаты и обсуждения

Анализ экспериментальных данных, приведенных в работах [3], [5]–[12] позволил автору на основании принципа наименьшего действия [13] установить две основные фундаментальные закономерности и предложить третью, сформулированную в работах [3], [14].

Первая закономерность. Определена асимметричная кинетическая зависимость между плотностью дислокаций и интенсивностью разрушения или изнашивания, а именно, увеличение плотности дислокаций до некоторого критического значения обуславливает упрочнение поверхностного слоя. Последнее определяет снижение интенсивности разрушения. Установлена обратная пропорциональная зависимость между локальным градиентом ориентации границ

структурных элементов кристаллической решетки или плотностью дислокаций на каждом из структурно-масштабных уровней деформации и интенсивностью разрушения поверхностного слоя никеля. Таким образом, зависимость плотности дислокаций от времени униполярна кинетике интенсивности изнашивания [5] и выполняется выражение:

$$\rho \cdot I = const,$$

где ρ – плотность дислокаций, I – интенсивность изнашивания, область определения $const \geq 0$.

Вторая закономерность. Скорость увеличения (K_1) и снижения плотности дислокаций (K_2) при трибонагрузке определяется предварительно сформированной структурой и разориентировкой внутренних границ раздела. Скорость увеличения плотности дислокаций при упрочнении поверхностного слоя никеля определяет и скорость снижения плотности дислокаций, и, соответственно, релаксации напряжений деформации для одного и каждого цикла изменения прочностных свойств. Выполняется выражение [13]:

$$\frac{K_1}{K_2} = const, \quad (2.1)$$

где $K = \Delta H / t$.

Необходимо отметить, что константа в выражении (2.1) близка к единице. Однако по мере аккумуляции энергии подповерхностными слоями с течением времени может доминировать хрупкий механизм разрушения, что приводит к увеличению скорости релаксации уширения линии ферромагнитного резонанса (K_2).

Третья закономерность. Основным условием совместности деформации на структурно-масштабных уровнях: нано, микро, мезо и макро является выполнение закона сохранения момента импульса, а именно, сумма моментов импульса равна нулю, что обеспечивает выполнение условия для зернограничного скольжения структурных элементов при пластической деформации. Выполняется закон сохранения момента импульса [3], [14]:

$$\sum_{i=1}^N Rot J_i = 0, \quad (2.2)$$

где J_i – потоки дефектов на i -м структурно-масштабном уровне.

Используем методы математической физики для описания процессов, протекающих в поверхностном слое никеля при трибонагрузке. Зависимость $\Delta H(t)$ имеет нелинейный волновой характер (рисунок 2.1).

С точки зрения методов математической физики, если за уширение линии ФМР (ΔH) принять одну из независимых переменных, описывающих состояние поверхностного слоя никеля [15], тогда изменение состояния поверхностного слоя никеля при трибонагрузке можно описать уравнениями в частных производных. С учётом рисунка 2.1, зависимость $\Delta H(t)$ имеет

нелинейный волновой характер. Используем волновое уравнение для описания физики процессов деформирования и разрушения поверхности никеля:

$$\frac{\partial^2 \Delta H}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Delta H}{\partial t^2}, \quad (2.3)$$

где v – скорость изменения плотности дислокаций, ΔH – уширение линии ферромагнитного резонанса.

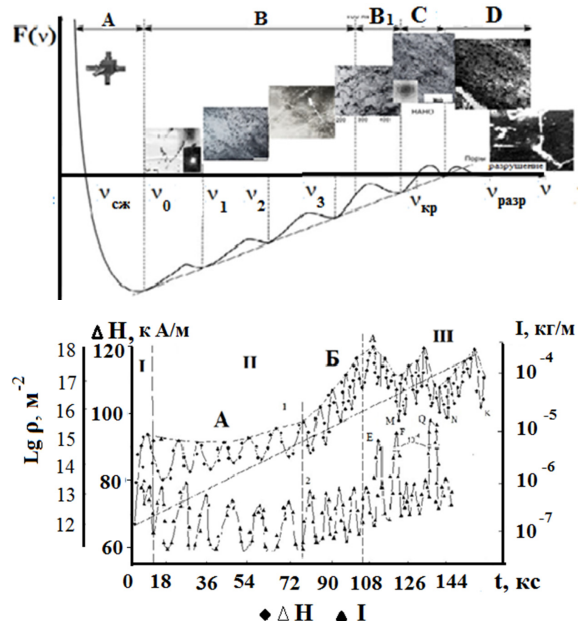


Рисунок 2.1 – Зависимость кинетики структурных изменений поверхностного слоя никеля при трении от потенциала Гиббса ($F(v)$), уширения линии ферромагнитного резонанса (ΔH) и интенсивности изнашивания (I)

Известно, что величина уширения линии ФМР (ΔH) прямо пропорциональна плотности дислокаций (ρ) [5]. Проведём анализ волнового уравнения с использованием экспериментальных данных, приведенных на рисунке 2.1. Рассмотрим область равновесной деформации (рисунок 2.1, область II) и область неравновесной деформации (рисунок 2.1, область III). Необходимо отметить, что отношение уширения линии ФМР (ΔH) ко времени (t), определённая как скорость изменения уширения линии ФМР (постоянная K), есть первая производная $\frac{\partial \Delta H}{\partial t}$. Вторая производная от уширения линии ФМР по времени $\frac{\partial^2 \Delta H}{\partial t^2}$ есть ничто иное как скорость изменения $\frac{\Delta H}{\Delta t}$, то есть скорость изменения огибающей функции $\Delta H(t)$ на рисунке 2.1, которая показана пунктиром. Проведём анализ этой огибающей для областей II и III с использованием установленных экспериментально граничных условий.

Область равновесной деформации II состоит из двух частей: часть А и часть Б. Огибающая функции $\Delta H(t)$ для области А можно аппроксимировать прямой линией параллельной оси времени на рисунке 2.1. Тогда выполняется выражение: $\frac{\partial^2 \Delta H}{\partial t^2} = 0$.

Произведение двух слагаемых $(1/v^2)$ и $(\frac{\partial^2 \Delta H}{\partial x^2})$ в волновом уравнении (2.3) равно нулю и, следовательно, выполняется выражение:

$$\frac{\partial^2 \Delta H}{\partial x^2} = 0.$$

Из первого закона Фика: $J = -\frac{D \cdot dC}{dx}$, где J –

диффузионный поток плотности дислокаций, прошедший через единицу площади в единицу времени, D – коэффициент диффузии, dC/dx – градиент концентрации плотности дислокаций в направлении диффузии следует, что поток плотности дислокаций через единицу площади в единицу времени является величиной постоянной. Естественно предположить, что этот поток направлен вглубь от поверхности. Учитывая то, что локальный градиент ориентации структурных элементов (χ) прямо пропорционален плотности дислокаций, следует, что:

$$\frac{\partial \chi}{\partial x} = const. \quad (2.4)$$

Локальный градиент ориентации структурных элементов (χ) в направлении (Ox) есть величина постоянная, которая обратно пропорционально снижается с увеличением расстояния от поверхности (рисунок 2.2). Тогда постоянная должна быть определена как в минус первой степени и тогда выражение (2.4) определяется в виде:

$$\frac{\partial \chi}{\partial x} = const^{-1}. \quad (2.5)$$

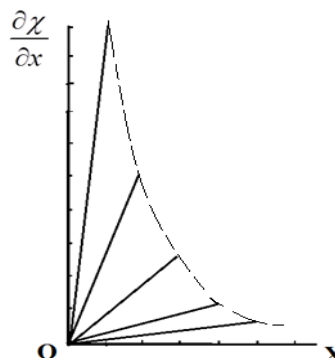


Рисунок 2.2 – Схема, качественно изображающая обратно пропорциональную зависимость изменения локального градиента ориентации структурных элементов (или плотности дислокаций) с увеличением расстояния или глубины от поверхности

Из анализа участка А области II на рисунке 2.1 следуют два вывода: поток плотности дислокаций через единичную площадь в единицу времени является величиной постоянной, направленной вглубь от поверхности; изменение локального градиента ориентации структурных элементов в направлении от поверхности есть величина постоянная, которая убывает в соответствии с обратной пропорциональной зависимостью с увеличением расстояния от поверхности.

Перейдём к анализу участка Б области II на рисунке 2.1.

Анализ волнового уравнения (2.3) участка Б на рисунке 2.1 показывает, что огибающая скорости изменения $\Delta H / \Delta t$ представляет прямую линию, направленную под углом 45° к оси времени, так как

$$\frac{\partial^2 \Delta H}{\partial t^2} \approx \frac{120 \text{ кА/м} - 95 \text{ кА/м}}{25 \text{ кс}} \approx 1 \text{ А/м} \cdot \text{с}.$$

Тогда выполняется выражение:

$$\frac{\partial^2 \Delta H}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Delta H}{\partial x^2} \approx 1 \text{ А/м} \cdot \text{с}. \quad (2.6)$$

Произведение двух величин равняется единице, когда каждое из них равно единице либо минус единице. Так как скорость движения плотности дислокаций по физическому смыслу не может принимать отрицательное значение, то выполняется система уравнений:

$$v = 1. \quad (2.7)$$

и

$$\frac{\partial^2 \Delta H}{\partial x^2} = 1. \quad (2.8)$$

Скорость движения плотности дислокаций вглубь от поверхности никеля есть величина постоянная, что следует из выражения (2.7). Из выражения (2.8) с учётом того, что $\frac{\partial \Delta H}{\partial x} = J$, где

J – поток плотности дислокаций через единичную площадь в единицу времени, следует выполнение выражения: $\frac{\partial J}{\partial x} = 1$, то есть градиент

потока дислокаций вглубь от поверхности никеля есть величина постоянная. Другими словами, число линейных дефектов (дислокаций), проходящих через единицу площадок, выстроенных на некотором расстоянии друг от друга вглубь от поверхности, в единицу времени есть величина постоянная (рисунок 2.3). Количественная оценка выражения (2.5) с использованием выражения (2.6) и (2.7) показывает, что на каждом цикле изменения прочностных свойств на участке Б рисунка 2.1 поток плотности дислокаций (J) через единичную площадь в единицу времени составляет $\approx 0,25 \text{ А/м} \cdot \text{с}$. С учётом того, что глубина поверхностного слоя никеля, в котором накапливается энергия фрикционного нагружения, составляет $\approx 100 \text{ мкм}$. Тогда распределение потока по

глубине (градиент потока) с шагом $\Delta X = 25 \text{ мкм}$ (рисунок 2.3) через единичную площадь в единицу времени составляет $\approx 0,06 \text{ А/м} \cdot \text{с}$.

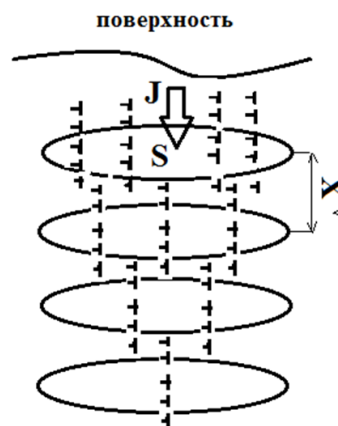


Рисунок 2.3 – Схема, качественно изображающая постоянный градиент потока плотности дислокаций с увеличением расстояния или глубины от поверхности

Из анализа участка Б области II на рисунке 2.1 следуют два вывода: скорость движения плотности дислокаций вглубь от поверхности является величиной постоянной $\approx 1 \text{ ((м} \cdot \text{с)}^{-1})$; поток градиента плотности дислокаций через единицу площади в единицу времени является величиной постоянной равной $\approx 1 \text{ (м}^4)$ и направлен вглубь от поверхности.

Анализ волнового уравнения (2.3) в области неравновесных процессов (рисунок 2.1, область III) показывает, что огибающая скорости изменения $\Delta H / \Delta t$ представляет собой осциллирующую (периодически возрастающую и убывающую) во времени зависимость, то есть градиент потока плотности дислокаций $\left(\frac{\partial J}{\partial x}\right)$ периодически увеличивается и уменьшается (рисунок 2.4) и изменяет свой знак, то есть изменяет свое направление.

Необходимо отметить, что для участка А и Б области II на рисунке 2.1 наблюдалось только увеличение абсолютного значения огибающей, а низко частотной (НЧ) составляющей не было. Период НЧ составляющей градиента потока плотности дислокаций составляет $23 \div 25 \text{ кс}$. Скорость увеличения НЧ составляющей

$$\frac{\partial^2 \Delta H}{\partial t^2} \approx \frac{120 \text{ кА/м} - 95 \text{ кА/м}}{10 \text{ кс}} \approx 2,5 \text{ А/м} \cdot \text{с}$$

обозначим её как K'_1 , а скорость снижения НЧ составляющей

$$\frac{\partial^2 \Delta H}{\partial t^2} \approx \frac{120 \text{ кА/м} - 95 \text{ кА/м}}{6 \text{ кс}} \approx 4,2 \text{ А/м} \cdot \text{с}$$

обозначим её как K'_2 . Отношение увеличения (K'_1) к снижению (K'_2) НЧ составляющей составляет $\approx 0,6$.

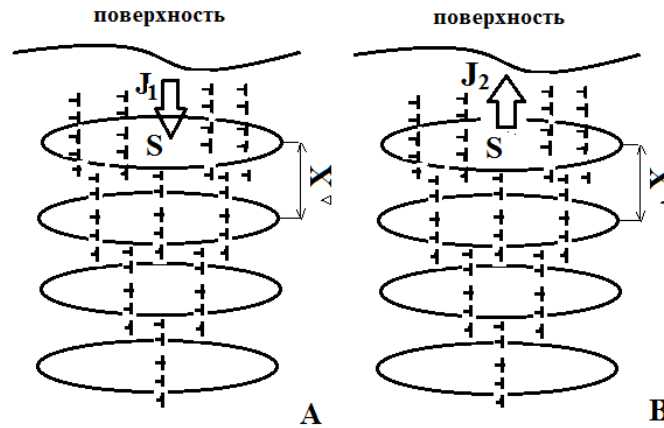


Рисунок 2.4 – Схема, качественно изображающая изменение направления градиента потока плотности дислокаций при увеличении и снижении напряжений внутри кристаллической решётки никеля с увеличением расстояния или глубины от поверхности: А – увеличение величины внутренних напряжений; Б – снижение величины внутренних напряжений

Выполняется выражение:

$$\frac{K'_1}{K'_2} = \frac{J_1}{J_2} = 0,6.$$

Градиент потока плотности дислокаций (J_2) при снижении величины напряжений превышает градиент потока плотности дислокаций (J_1) при увеличении величины напряжений в $\approx 1,7$ раза. С учётом выполнения соотношения (2.2), где сумма потоков дефектов равна нулю, следует, что для выполнения условия пластичности и аморфности поверхностных слоёв никеля в пределах одного цикла НЧ составляющей (не включая точки M , N и K на рисунке 2.1) поток плотности дислокаций при снижении величины напряжений соответственно увеличивается в $\approx 1,7$ раза.

Нисходящие и восходящие потоки дефектной структуры и осциллирующий характер напряжений определяют формирование высокоразвитого рельефа (рисунок 2.5), складки которого можно интерпретировать как гофрированный поверхностный слой. Высокая плотность дислокаций в локальных зонах, в виде ярко выраженных точек белого цвета, определяет динамическую рекристаллизацию с формированием структур с высоким модулем упругости.

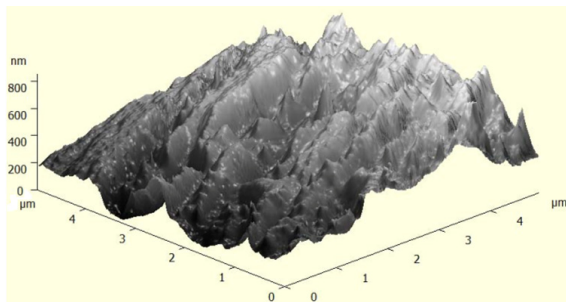


Рисунок 2.5 – Трёхмерное изображение СМ-изображения поверхности никеля с наноструктурными образованиями

В точках минимума (т. M , N и K) зависимости уширения линии ФМР (ΔH) от времени (t) (рисунок 2.1, кривая 1, область III), где происходит локализованный во времени лавинообразный селективный механизм разрушения с увеличением интенсивности изнашивания на два – три порядка (рисунок 2.1, область III, кривая 2, т. E , F , Q) имеет место нарушение закона сохранения момента импульса, т. е. выражения (2.2). Реализуется принцип наименьшего действия, где селективный механизм разрушения пористого слоя определяет удаление очагов несплошности материала (микротрещин, пор, двойников, дефектов упаковок и т. д.), что определяет сохранение долговечности материала с позиций синергетики и препятствует проникновению трещин вглубь от поверхности.

Из анализа области III на рисунке 2.1 следуют четыре вывода: градиент потока плотности дислокаций $\left(\frac{\partial J}{\partial X}\right)$ периодически увеличивается

и уменьшается при увеличении времени трибонагрузки; градиент потока плотности дислокаций изменяет своё направление; увеличение интенсивности градиента восходящих и нисходящих потоков плотности дислокаций обуславливает увеличение нижнего предела изменения интенсивности изнашивания, как минимум в ≈ 7 раз, а верхнего предела изменения интенсивности изнашивания при лавинообразном селективном механизме разрушения поверхностного слоя на три порядка; градиент потока плотности дислокаций (J_2) при снижении величины напряжений превышает градиент потока плотности дислокаций (J_1) при увеличении величины напряжений в $\approx 1,7$ раза.

Анализ полученных результатов с использованием просвечивающей электронной микроскопии показал [8], что основными микроструктурными элементами диспергирования

поверхностного слоя являются: 1) зоны с высокой плотностью дислокаций, со временем нагружения приобретающие форму тонких жгутов и ориентирующиеся вдоль направления скольжения; 2) полосы скольжения и многочисленные тонкие двойники по их границам, являющиеся источниками зарождения мелких трещин; 3) многочисленные микропоры внутри деформированной решетки и по границам зерен, их коагуляция приводит к формированию очагов транскристаллитного и интеркристаллитного разрушения (рисунок 2.6, а). Длительное фрикционное нагружение приводит к прогрессирующему разрушению поверхностного слоя никеля (рисунок 2.6, б), связанному с возрастанием числа очагов разрушения [10]. Неравновесные вакансии на узлах решетки никеля в условиях пластической дисторсии формируют механизм коалесценции микропористость, которая является прекурсором пластических сдвигов [15]–[17] мезо и макромасштабов, определяющих лепестково-послойный механизм разрушения [12], [18] и лавинообразное селективное разрушение поверхности [8] в локальный момент времени.

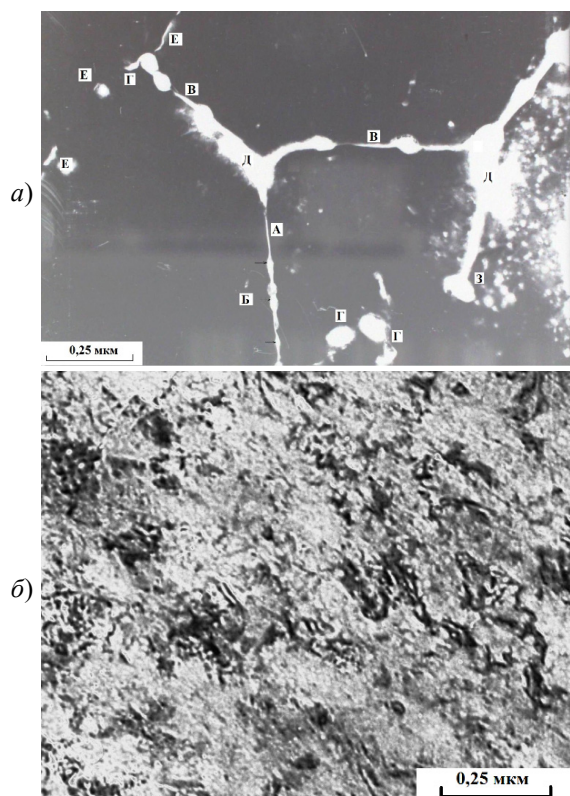


Рисунок 2.6 – Формирование пор и разрушение по границам зёрен и через зерно (а); диспергирование и разрыхление поверхностного слоя ($t = 150$ кс) (б)

В сильно деформированной кристаллической решётке развивается высокая пористость, достигающая $\approx 25\%$ от общего объёма материала и высокая концентрация микротрещин и других нарушений сплошности материала [5].

Необходимо отметить, что надо проводить дальнейшие системные исследования по установлению основных инвариантных закономерностей.

Заключение

Установлено, что кинетика формирования структуры и эволюции поверхности раздела металлов при их трибонагружении протекает в соответствии со следующими положениями неравновесной термодинамики:

- каждому устойчивому состоянию поверхности раздела металлов будет соответствовать своя структура с определённым значением свободной энергии и, соответственно, с видами её перераспределения между элементами границ и внутри структурного образования;

- система стремится занять положение или сформировать такую структуру поверхности раздела, которой соответствует минимальный термодинамический потенциал Гиббса;

- если действие нагрузочно-скоростных параметров или внешнего воздействия превышает некоторую критическую величину поступившей в систему энергии, то она переходит в новое структурное состояние, характеризующееся более низким значением свободной энергии;

- интенсивность внешнего воздействия определяет длительность цикла изменения прочностных характеристик, величину накопления энергии деформации и степень фрагментации кристаллической решётки металлов, и соответственно локальный градиент ориентации границ структурных элементов, где их геометрический размер, количество, плотность, и взаимодействие определяют доминирующую роль того или иного масштабного уровня пластической деформации в тот или иной момент времени кинетики структурообразования, и механизм его разрушения в соответствии с минимумом потенциальной энергии взаимодействия сформировавшейся структуры.

Анализ кинетики процессов деформации и разрушения масштабных уровней: нано, субмикро, микро, мезо и макро с использованием граничных условий, прикладываемых к нелинейному волновому уравнению, показывает, что:

- в области равновесной деформации при отсутствии градиента потока структурных дефектов (рисунок 2.1, область А): поток плотности дислокаций является величиной постоянной, направленной вглубь от поверхности; изменение локального градиента ориентации структурных элементов есть величина постоянная, которая убывает в соответствии с обратной пропорциональной зависимостью с увеличением расстояния от поверхности;

- в области равновесной деформации при наличии градиента потока структурных дефектов: скорость движения плотности дислокаций (рисунок 2.1, область Б) вглубь от поверхности является величиной постоянной равной ≈ 1 (м·с)⁻¹; поток градиента плотности дислокаций через

единицу площади в единицу времени является величиной постоянной ≈ 1 (м^4);

– в неравновесной деформации (рисунок 2.1, область III): градиент потока плотности дислокаций изменяет своё направление; градиент потока плотности дислокаций имеет осциллирующий характер во времени; увеличение интенсивности градиента восходящих и нисходящих потоков плотности дислокаций обуславливает увеличение нижнего предела изменения интенсивности изнашивания как минимум в ≈ 7 раз, а верхнего предела изменения интенсивности изнашивания при лавинообразном селективном механизме разрушения поверхностного слоя на три порядка; градиент потока плотности дислокаций (J_2) при снижении величины напряжений превышает градиент потока плотности дислокаций (J_1) при увеличении величины напряжений в $\approx 1,7$ раза.

Таким образом, количество накопления дефектов, их размер и взаимодействие определяют процесс саморегуляции в области неравновесной деформации. Накопление дефектов поверхностным слоем и связанное с этим увеличение скрытой энергии деформации понижает уровень энергии активации процессов релаксации на столько, что эти процессы при дальнейшем деформировании играют роль своеобразного регулятора как количества дефектов, так и способа их взаимодействия и распределения. Реализуется принцип наименьшего действия, где селективный механизм разрушения пористого и аморфного слоя определяет удаление очагов несплошности материала (микротрещин, пор, двойников, дефектов упаковок и т. д.), что определяет сохранение целостности и сплошности материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moser, B. Cyclic strain hardening of nanocrystalline nickel / B. Moser, T. Hanlon, K.S. Kumar // *Scripta Mater.* – 2006. – Vol. 54, № 6. – P. 1151–1155.
2. *Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах* / В.Е. Панин [и др.]. – Новосибирск: СО РАН, 2006. – 520 с.
3. *Multiscale of Lattice Curvature on Friction Surfaces of Metallic Materials as a Basis of Their Wear Mechanism* / V.E. Panin, V.G. Pinchuk, S.V. Korotkevich, S.V. Panin // *Physical Mesomechanics.* – Vol. 20, № 1. – 2017. – P. 69–77.
4. Панин, В.Е. Физическая мезомеханика деформируемого твёрдого тела как многоуровневой системы. I. Физические основы многоуровневого подхода / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, А.В. Панин // *Физическая мезомеханика.* – 2006. – Т. 9, № 3. – С. 9–22.
5. Пинчук, В.Г. Кинетика упрочнения и разрушения поверхности металлов при трении / В.Г. Пинчук, С.В. Короткевич // LAP Lambert Academic Publishing. – Saarbrücken: LAP, 2014. – 180 с.
6. Короткевич, С.В. *Диагностика опор качения и скольжения по состоянию поверхности*

раздела сопряжённых тел физическими методами / С.В. Короткевич, В.Г. Пинчук, В.В. Кравченко // LAP Lambert Academic Publishing. – Saarbrücken: LAP, 2016. – 266 с.

7. Pinchuk, V. Physical patterns of dislocation structure kinetics in friction loaded surface layers / V.G. Pinchuk, S.V. Korotkevich // *Global Journal For Research Analysis.* – 2015. – Vol. 4, № 5. – P. 255–257.

8. Pinchuk, V.G. Kinetics of Microstructure and Selective Mechanism of Fracture of Metal Surface Layer under Friction / V. G. Pinchuk, I. A. Buyanovskiy, S. V. Korotkevich // *Inorganic Materials: Applied Research.* – 2015. – Vol. 6, № 5. – P. 355–359.

9. Pinchuk, V.G. Microstructure evolution in friction-loaded layers of nickel / V.G. Pinchuk, S.V. Korotkevich // *Indian Journal of Research.* – 2015. – Vol. 4, № 2. – P. 8–10.

10. Pinchuk, V.G. Relationship of Microstructural Criteria of Fracture and Evolution of Metal Surface and Physicochemical Properties of Medium at Friction / V.G. Pinchuk, S.V. Korotkevich, E.A. Kovalev // *Inorganic Materials: Applied Research.* – 2017. – Vol. 8, № 4. – P. 539–545.

11. Pinchuk, V.G. Influence of the physical and chemical nature of quenching medium and friction regimes on the structure and kinetics of hardening and destruction of the surface layer of nickel / V.G. Pinchuk, S.V. Korotkevich, E.A. Kovalev // *Inorganic Materials: Applied Research.* – 2018. – Vol. 9, № 4. – P. 736–740.

12. *Структурно-масштабные уровни деформации поверхностного слоя никеля* / С.В. Короткевич, В.В. Свиридова // *Проблемы физики, математики и техники.* – 2020. – № 2 (43). – С. 17–22.

13. Korotkevich, S.V. Hamilton's principle for to search of invariants at creation, evolution and destruction of nanomaterials / S.V. Korotkevich // *International Journal of Engineering Research and Science.* – 2018. – Vol. 4, iss. 6. – P. 31–41.

14. Панин, В.Е. Физические основы мезомеханики среды со структурой / В.Е. Панин // *Изв. Вузов. Физика* – 1992. – Т. 35, № 4. – С. 5–18.

15. Николис, Г. Самоорганизация в неравновесных процессах / Г. Николис, Н. Пригожин. – М.: Мир, 1977. – 512 с.

16. Intrater, I. Grain boundary and intercrystalline cracking / I. Intrater, E.S. Machlin // *Acta Metall.* – 1959. – Vol. 7, № 2. – P. 140–142.

17. Neuman, P. Coarse slip model of fatigue / P. Neuman // *Acta metallurgical.* – 1969. – Vol. 17, № 9. – P. 1219–1225.

18. Holste, C. Cyclic plasticity of nickel, from single crystals to submicrocrystalline polycrystals / C. Holste // *Philosophical Magazine.* – 2004. – Vol. 84, № 3–5. – P. 299–315.

19. Suh, N.P. An overview of the delamination theory of wear / N.P. Suh // *Wear.* – 1977. – Vol. 44, № 1. – P. 1–16.

Поступила в редакцию 15.11.2020.