

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО НИКЕЛЯ ПРИ ТРЕНИИ

С.В. Короткевич¹, М. С. Короткевич²

1 – РУП «Гомельэнерго», e-mail: korotsv@tut.by

2 – УО БГУИР, e-mail: korotkevichmariya@gmail.com

Согласно современным представлениям пластическая деформация твёрдых тел реализуется на нескольких взаимосвязанных структурных уровнях, масштаб которых определён природой структурных дефектов, ответственных за формоизменение. В большинстве случаев распределение зон локализации упорядочено в пространстве и во времени, а тип локализации определяется законом пластического течения. Рассмотрение твёрдого тела в качестве многоуровневой иерархически организованной системы, состоящей из 3D – кристаллической и 2D-планарной подсистем, обуславливает резкое возрастание роли кривизны кристаллической структуры при описании поведения твёрдых тел в полях внешних воздействий [1].

Современное состояние проблемы прочности материалов, требует знания основных закономерностей упрочнения и разрушения поверхностных объёмов при фрикционном нагружении. Известно, что формирование наноструктур в 3D материале происходит в условиях высоких контактных давлений $\approx 6 - 12$ ГПа, реализующихся, например, в мельнице Бриджмена [2] или при сжатии, или растяжении материала, сопровождающейся высокой степенью пластической деформации. Поверхность никеля представляет собой 2D планарную подсистему, где атомы не связаны так прочно, как в 3D кристаллической решётке. В общем случае, поверхность твёрдого тела представляет собой дефект строения уже в силу ассиметричного характера притяжения атомов поверхности. Это определяет основные физико-химические свойства поверхности – свободную энергию и потенциал выхода электрона [3]. Естественно возникает вопрос о возможности формирования нанокристаллических структур при низких контактных давлениях (≈ 100 кПа) в условиях аккумуляции свободной энергии поверхностью металла. Другими словами можно ли получить те же структуры с высокой степенью разориентировки и соответственно обладающими уникальными свойствами при давлении, отличающемся на пять порядков? Если да, то каковы условия реализации этого процесса?

Исследовался поликристаллический никель чистотой 99,99 %. Образцы в виде тонких дисков размером $5 \times 0,1$ мм² перед фрикционными испытаниями электролитически полировали для формирования одинаковой гладкой поверхности 11 класса шероховатости и затем отжигали в вакууме 0,133 мПа при 973 К в течение $\approx 14,4$ кс. Трение поверхности никеля по молибдену проводили на машине трения АЕ-5 по схеме палец (Ni)-диск (Mo) при контактном давлении ≈ 84 кПа и линейной скорости $\approx 0,5$ м/с. В качестве смазочной среды использовали пластичный смазочный материал ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 21150-75). Средняя объёмная температура образца не превышала $\approx 40^\circ$ С.

Электронномикроскопические исследования проводили в ГЦ «БЕЛМИКРОАНАЛИЗ». Электронномикроскопические снимки получены на просвечивающем электронном микроскопе Н-800 (Hitachi, Япония) и микроскопе ЭМВ – 100АК методом тонких фольг на «просвет». Фольги получали путём одностороннего электролитического утончения дисков с противоположной стороны от поверхности трения на установке струйного полирования, оснащённой чувствительным фотодиодным мостом, позволяющим контролировать прозрачность участков на

глубине $\approx 0,1$ мкм от поверхности трения. Плотность дислокаций определяли по микрофотографиям методом взаимно перпендикулярных секущих.

АСМ изображения поверхности получены с использованием сканирующего зондового микроскопа NT-206 производства ОДО “Микротестмашины”.

Уширение линии ферромагнитного резонанса (ФМР) образцов никеля регистрировалось с использованием разработанного и автоматизированного установки [4].

На рис. 1 представлена кинетика уширения линии ФМР (ΔH) и изнашивания (I) поверхности никеля в результате многоциклового и малоамплитудного контактного взаимодействия в среде ПАВ, содержащихся в смазочном материале ЦИАТИМ-201.

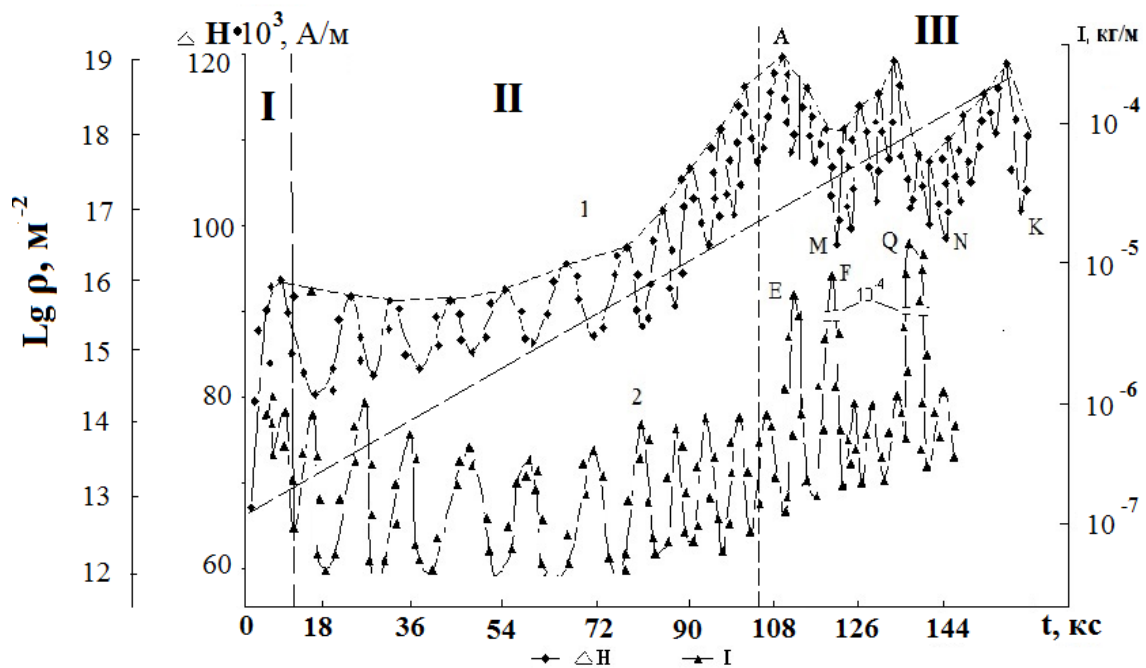


Рисунок 1 - Зависимость ширины линии ФМР (ΔH) и интенсивности изнашивания (I) от времени трения t

Отличительной особенностью возникновения нанокристаллических структур при трении от возникновения при интенсивной пластической деформации является то, что они уже начинают формироваться при относительно малом времени $t = 0,9$ кс (рис. 1) на стадии упрочнения поверхности в присутствии поверхностно и химически-активных веществ, содержащихся в смазочном материале ЦИАТИМ-201. Учитывая, что образец никеля предварительно отжигался в вакууме [4], а величина номинального контактного давления в зоне трения была невелика и составляла ≈ 84 кПа можно утверждать, что данные образования образуются не только при наличии высоких контактных давлений, обуславливающих интенсивную пластическую деформацию, но и условиях неравновесного деформирования (область I на рис. 1), когда очагов разрушения, а именно, полос скольжения, микротрещин, двойников, пор, вакансий ещё нет и плотность дислокаций предварительно отожжённого в вакууме образца никеля минимально возможная $\approx \rho = 10^{12} m^{-2}$ при $t = 0,9$ кс и механизмов релаксации энергии ещё не образовалось, реализуется единственно возможный механизм расщепления дислокаций на поверхности никеля. Реализуется принцип наименьшего действия или наибольшей энергетической выгоды при максимально возможном результате —

максимальном напряжении, высокой плотности дислокаций и их расщеплении при формировании наноструктур (рис. 2).

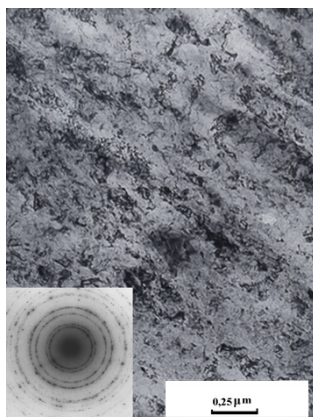


Рисунок 2 – Нанокристаллическая структура на поверхности никеля. Вставка микродифракция нанокристаллической структуры

Установлены закономерности и механизмы упрочнения и разрушения нанокристаллических структур размером $\approx 5\text{--}50$ нм с высокоугловой разориентацией границ ячеек $\approx 5\text{--}10^\circ$ при начальном цикле ($\approx 0,9$ кс) упрочнения поверхностного слоя при контактом давлении ≈ 84 кПа, заключающиеся: в образовании дислокаций на поверхности никеля при трении и в облегчённом их выходе на поверхность в присутствии поверхностно и химически-активных веществ; их расщеплении; увеличении локальной кривизны кристаллической структуры, с образованием большой концентрации вакантных узлов в условиях неравновесной деформации и нелинейной динамике структурообразования, когда скорость увеличения напряжений превышает скорость их релаксации. Эти нанокристаллические и субмикроскопические фрагменты структуры обуславливают высокую прочность и износостойкость [1, 4]. Сформировавшееся нанокристаллическая структура эффективно удерживает смазку.

Литература

1. Мультистейлинг локальной кривизны кристаллической решетки на поверхностях трения металлических материалов как основа механизма их изнашивания / В.Е. Панин [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 72–81.
2. Панин, В.Е. Физическая мезомеханика измельчения кристаллической структуры при интенсивной пластической деформации / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 5. – С. 5–16.
3. Костецкий, Б. И. Механо-химические процессы при граничном трении / Б.И. Костецкий, М.Э. Натансон, Л.И. Бершадский. – М.: Наука. – 1972. – 170 с.
4. 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.