

PACS: 67.72.Ji

Е.Г. Пашинская¹, В.Н. Варюхин¹, И.В. Лейрих², М.А. Антонова²,
И.И. Тищенко¹, В.М. Ткаченко¹

ИССЛЕДОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В МЕДИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО КОМБИНИРОВАННОГО НАГРУЖЕНИЯ

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

²Донецкий национальный технический университет
ул. Артема, 58, г. Донецк, 83000, Украина

Представлены данные о процессах накопления дефектов в условиях интенсивной холодной комбинированной деформации (ИХКД) кручением и растяжением при постоянной нагрузке на образцах медной проволоки после отжига. Показано, что изменения микротвердости и электросопротивления имеют сложный характер в зависимости от общего количества оборотов и от направления вращения. Наблюдаемые изменения свойств связаны с изменением количества вакансий: увеличением – при кручении в одну сторону; уменьшением – при кручении в противоположную сторону (на начальных стадиях) вследствие развития процессов аннигиляции.

Введение

В настоящее время активно развиваются исследования свойств металлов, подвергнутых ИХПД. В качестве способа деформации часто выбирают комбинированную схему нагружения, заключающуюся в сочетании кручения и сжатия, кручения и растяжения и т.д. Исследования, выполненные на меди, цветных и черных сплавах, показывают ряд существенных отличий в поведении различных материалов при комбинированном нагружении ([1–4] и др.). Отмечается формирование специфической микроструктуры, состоящей из зерен размером менее 1 μm , разделенных большеугловыми границами. Явление резкого измельчения зерна связывают с получением высокой плотности дефектов кристаллического строения. Показано, что на процесс деформации и последеформационные структурные изменения влияют не только тип решетки (количество систем скольжения) и интенсивность деформации, но также схема приложения деформирующих нагрузок.

В частности, для меди установлены заметные различия в поведении образцов, деформированных прокаткой и кручением под давлением [2]. В об-

разцах, испытавших кручение, изменения свойств начинаются при меньшей ($< 100^\circ\text{C}$) температуре нагрева, несмотря на то, что повышенный уровень микротвердости сохраняется до более высоких температур по сравнению с прокатанными образцами. Авторы обращают внимание на значительное вакансионное пересыщение при ИХПД кручением под давлением, вклад которого в процессы возврата и метадинамической рекристаллизации изучен недостаточно.

Интенсивная холодная деформация влияет на уровень накопленной энергии в каждом зерне, которая существенно зависит от первоначальной ориентировки зерен, приводя к сильному изменению температуры рекристаллизации от зерна к зерну [5]. В возникшей дискуссии [6–8] обсуждаются вопросы влияния значительной интенсификации массопереноса при ИХПД на формирование ультрамелкого зерна. Рассматривается диффузионный (связанный с генерацией и движением межузельных атомов) и бездиффузионный механизмы массопереноса при формировании структуры ИХПД. Предполагается накопление большого количества неравновесных вакансий и их взаимодействие с движущимися дислокациями.

Целью работы является экспериментальное изучение процессов накопления дефектов в условиях ИХПД кручением и растяжением при постоянной нагрузке.

Материал и методика эксперимента

Исследования выполнены на образцах $\varnothing 2.2$ mm и рабочей длиной $l_0 = 70$ mm из меди М1. Все образцы предварительно отжигали в течение 1 h при температуре 500°C . Кручение образцов проводили на установке К-5, у части образцов после достижения определенного числа оборотов N_1 направление вращения изменяли на противоположное с числом оборотов N_2 . Растягивающая нагрузка была постоянной – 48 N (возникающие условные напряжения 13 N/mm^2 составляли примерно 6% от σ_b). После деформации на образцах 4-зондовым методом измеряли электросопротивление, изменение которого оценивали по сравнению с электросопротивлением исходного недеформированного образца. Микротвердость образцов измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0.25 N с фиксированным шагом в продольном (150 μm) и поперечном (100 μm) направлениях.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Примем за характеристику деформации общее суммарное число оборотов $N = N_1 + N_2$, в зависимости от которого на рис. 1 приведено изменение электросопротивления $\Delta\rho = \rho - \rho_0$ по отношению к электросопротивлению недеформированного образца. Как видно из рисунка, сопротивление сложным образом изменяется с увеличением общей деформации. Условно данные можно разделить на две группы: результаты первой группы соответствуют известному степенному изменению электросопротивления металла при кру-

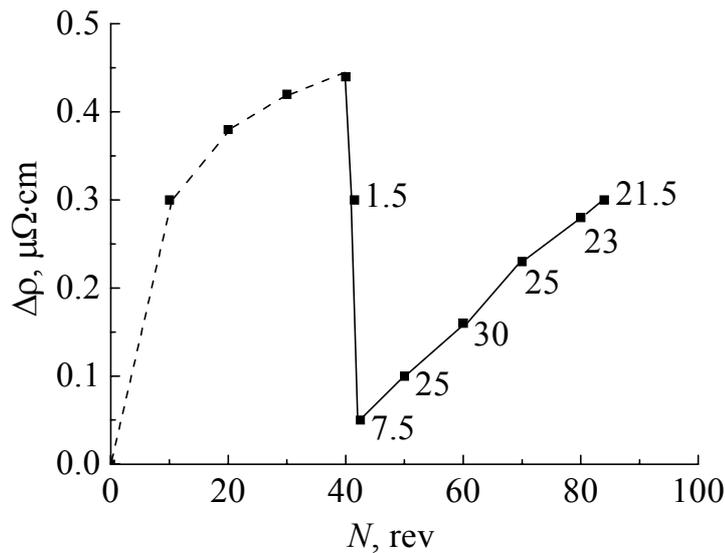


Рис. 1. Зависимость изменения электросопротивления $\Delta\rho$ медной проволоки от количества оборотов при кручении по часовой стрелке (—) и в обе стороны (---) (цифры у точек показывают количество оборотов против часовой стрелки)

чении [9]. Вторая группа точек соответствует началу кручения в противоположную сторону. Фиксируется резкое падение $\Delta\rho$ и постепенный рост сопротивления с увеличением общего числа циклов и количества оборотов при кручении в противоположную сторону.

Учитывая используемую схему деформирования вращением в противоположные стороны, следует уточнить полученные результаты изменения электрического сопротивления меди. Для этого на рисунке у каждой экспериментальной точки второй группы указано число оборотов против часовой стрелки. Кручение без изменения направления вращения вызывает повышение сопротивления образцов (первая группа точек). Уже после полутора оборотов в противоположном направлении (вторая группа точек) сопротивление падает. Дальнейшее увеличение числа оборотов N_2 опять приводит к росту $\Delta\rho$, однако изменение зависит от соотношения $N_1 \leftrightarrow N_2$ и общего суммарного числа оборотов N .

Известно, что существенное влияние на электропроводность металлов оказывают точечные дефекты. По оценкам [9], вклад межузельных атомов в изменение сопротивления примерно в 2 раза сильнее влияния вакансий (в пересчете на at.%), влияние остальных дефектов на несколько порядков меньше. Однако химический состав образцов меди, термическое состояние и растягивающая нагрузка оставались на протяжении опыта постоянными для всех образцов. Варьировалась только степень деформации путем изменения количества оборотов при кручении. Поэтому наблюдаемые эффекты связаны преимущественно с изменением количества точечных дефектов, и объяснять полученные результаты должно на основании особенностей деформации при комбинированном нагружении. Авторы [10] показали, что одноосное нагружение способствует генерации межузельных атомов, а кручение – генерации вакансий.

Основной источник точечных дефектов в данном случае – скользящие винтовые дислокации с элементарными порогами краевой ориентации. При перемещении в одну сторону за «протаскиваемым» порогом образуется це-

почка точечных дефектов (вакансий и межузельных атомов). Из-за быстрого изменения направления вращения не все вакансии аннигилируют тогда, когда порог «протаскивается» в обратном направлении [11]. Происходящая частичная взаимная аннигиляция дефектов изменяет электросопротивление образца. Именно поэтому степень аннигиляции дефектов зависит от числа оборотов в одну и другую стороны, а именно от соотношения концентраций точечных дефектов, влияющих на общее сопротивление.

Измерения микротвердости в поперечном и продольном сечениях образцов, деформированных растяжением и кручением в одну сторону, показывают незначительное уменьшение микротвердости в поперечном сечении и значительное (на 300 единиц) снижение в продольном. Это объясняется формированием большого количества вакансий при деформации и их предпочтительным расположением в направлении растягивающих усилий. Хорошо известно [12], что при холодной одноосной деформации ГЦК-металлы имеют текстуру, в которой направления $\langle 111 \rangle$ параллельны оси деформации. В процессе деформации при комнатной температуре скольжение происходит по плоскостям $\{111\}$ в направлениях $\langle 110 \rangle$. По-видимому, это и обуславливает преимущественное расположение дефектов при растяжении с кручением.

При смене направления вращения на противоположное и при выполнении полутора оборотов значения микротвердости в поперечном и продольном сечениях становятся равными (рис. 2). Этот факт подтверждает частичную аннигиляцию точечных дефектов и их перераспределение относительно оси деформации. Об этом также свидетельствует увеличение плотности металла при смене направления вращения (таблица). Кручение в одну сторону приводит к снижению плотности до 8.73 g/mm^3 , а кручение в другую – к увеличению плотности до 8.957 g/mm^3 (десять оборотов против часовой стрелки).

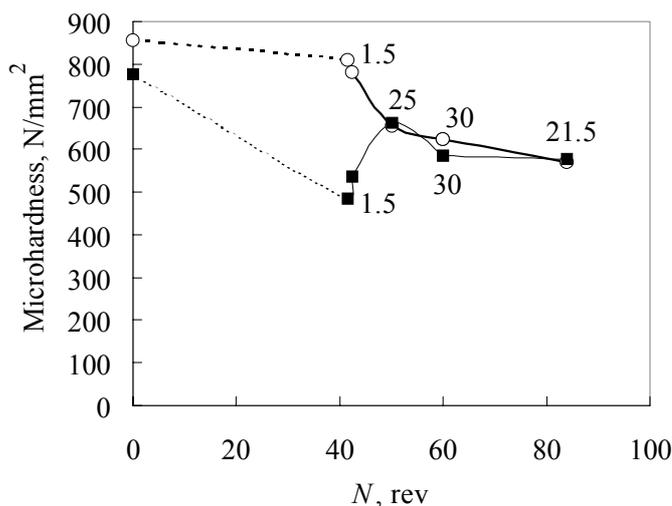


Рис. 2. Зависимость микротвердости медной проволоки в поперечном (—o—) и продольном (—■—) сечениях от количества оборотов при кручении по часовой стрелке (---) и в обе стороны (—) (цифры у точек показывают количество оборотов против часовой стрелки)

Таблица

Изменение плотности образцов в зависимости от количества оборотов и направления вращения

Количество оборотов		Общее количество оборотов N	Плотность, g/mm^3
по часовой стрелке N_1	против часовой стрелки N_2		
25	0	25	8.73
	2	27	8.84
	5	30	8.946
	10	35	8.957

Увеличение количества оборотов против часовой стрелки принципиально не меняет соотношение значений микротвердости в разных сечениях. Расчет средних значений микротвердости по всему объему образца показывает плавное снижение микротвердости (более чем на 200 единиц) при повышении общего количества оборотов. Анализ средней микротвердости образцов (рис. 3) свидетельствует об общем снижении ее значений в начале кручения по часовой стрелке, что соответствует формированию пористости. При проведении кручения в противоположную сторону уже на начальном этапе наблюдается значительный рост микротвердости, что может быть связано либо с ростом общего наклепа, либо с аннигиляцией дефектов. В пользу послед-

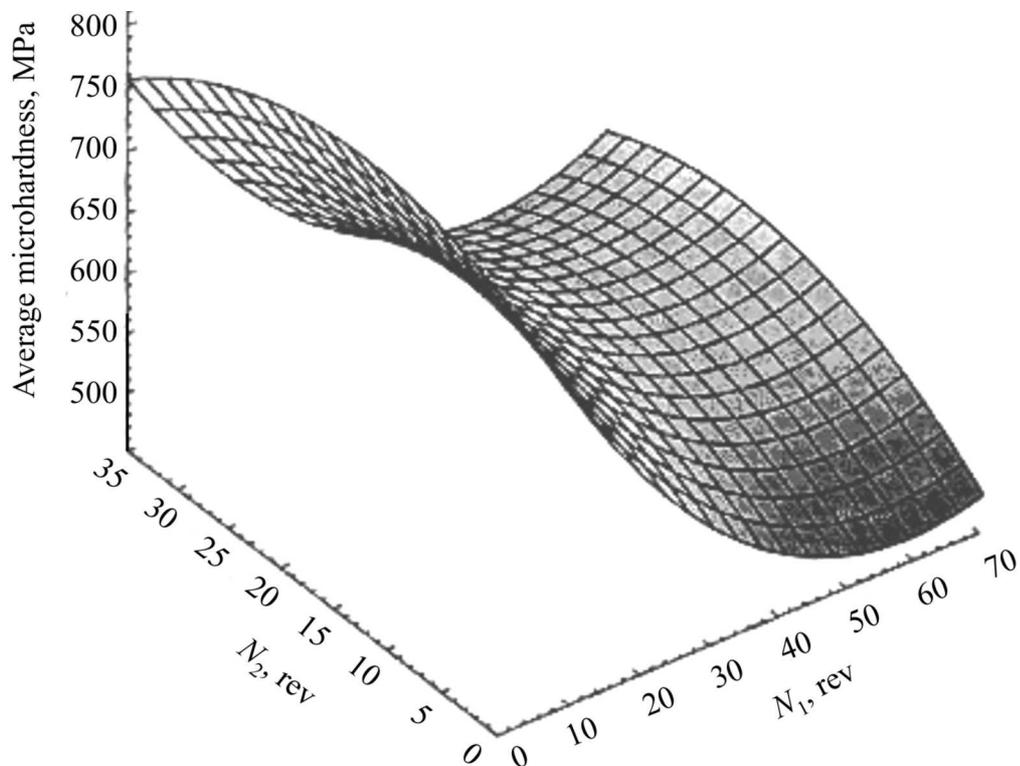


Рис. 3. Зависимость средней микротвердости медной проволоки от количества оборотов при кручении по (N_1) и против (N_2) часовой стрелки

него фактора может свидетельствовать то, что в случае роста микротвердости из-за наклепа такой же процесс роста микротвердости должен был бы наблюдаться и при кручении в одну сторону, а в опытах подобный рост не фиксировался. Поскольку при растяжении с кручением сталкиваются два складывающихся аддитивно конкурирующих процесса (порообразование и изменение структуры вследствие наклепа), то для выяснения вопроса о величине вклада каждого фактора требуется провести дальнейшие исследования, направленные на изучение структуры и механических свойств деформированной кручением и растяжением меди.

Выводы

Настоящим исследованием проведен анализ процессов накопления дефектов в условиях интенсивной комбинированной деформации кручением в противоположные стороны и растяжением при постоянной нагрузке. Анализ результатов показал, что накопление дефектов при пластической деформации кручением и растяжением сложным образом зависит от количества оборотов, а также от направления вращения: следует учитывать, осуществляется ли вращение только в одном направлении или в разные стороны. При вращении в одном направлении электросопротивление металла изменяется по известной степенной зависимости [9], что можно объяснить ростом межатомных расстояний в кристаллической решетке меди из-за увеличения в ней количества дефектов кристаллического строения, в частности вакансий. При быстрой смене направления вращения происходит частичная взаимная аннигиляция дефектов, что приводит к падению электросопротивления практически до исходного состояния. С увеличением (> 13) числа оборотов в противоположную сторону электросопротивление снова начинает расти с еще большей интенсивностью, так как с повышением степени деформации количество межузельных атомов и вакансий увеличивается, возобновляется процесс накопления точечных дефектов.

1. В.Н. Варюхин, Е.Г. Пашинская, З.А. Самойленко, В.Г. Сынков, В.В. Пашинский, Я.Е. Бейгельзимер, С.Г. Сынков, *Металлы* № 4, 79 (2001).
2. В.М. Фарбер, О.В. Селиванова, *Металлы* № 3, 45 (2003).
3. М.В. Дегтярев, Л.М. Воронова, Т.И. Чащухина, *Металлы* № 3, 53 (2003).
4. В.В. Столяров, Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск (2000).
5. G. Mohamed, V. Vacroix, *Acta mater.* **48**, 3295 (2000).
6. В.И. Фарбер, *МиТОМ* № 8, 3 (2003).
7. Ю.А. Скаков, *МиТОМ* № 4, 3 (2004).
8. М.А. Штрель, *МиТОМ* № 4, 12 (2004).
9. Б.Г. Лившиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Линецкий, *Физические свойства металлов и сплавов*, Металлургия, Москва (1980).

10. *И.И. Новиков, К.М. Розин*, Кристаллография и дефекты кристаллической решетки, Металлургия, Москва (1990).
11. *F.R.N. Nabarro*, Phys. Status Solidi **A104**, 47 (1987).
12. *И.Ш. Берин, Н.З. Днестровский*, Производство медной и алюминиевой проволоки, Металлургия, Москва (1975).

E.G. Pashinskaya, V.N. Varyukhin, I.V. Leyrich, M.A. Antonova, I.I. Tishchenko, V.M. Tkachenko

INVESTIGATION OF DEFECT ACCUMULATION IN COPPER UNDER SEVERE COMBINED LOADING

Data are represented on the processes of defect accumulation in samples of annealed copper wire under severe combined cold torsional and tensile deformation at constant load. Changes in microhardness and electrical resistance are shown to be of complex character depending on the total quantity of revolutions and direction of rotation. The observed changes of properties are associated with changes in the quantity of vacancies: the increasing upon torsion in one direction and decreasing at the initial stages of torsion in the opposite one on account of partial annihilation processes developed.

Fig. 1. Dependence of a change in copper wire electrical resistance $\Delta\rho$ on quantity of revolutions upon torsion clockwise (---) and in both directions (—) (numerals at points show the quantity of anti-clockwise revolutions)

Fig. 2. Dependence of microhardness of copper wire in cross- (—○—) and longitudinal (—■—) sections on quantity of revolutions upon torsion clockwise (---) and in both directions (numerals at points show the quantity of anti-clockwise revolutions)

Fig. 3. Dependence of the average microhardness of copper wire on quantity of revolutions upon torsion clockwise (N_1) and anti-clockwise (N_2)