

Таким образом, поток водорода, обусловленный действием градиента напряжений после калибровки, в каждый момент времени равен снижению массы водорода за счет его участия в концентрационной диффузии, которая развивается благодаря участию водорода, увлеченного силовой диффузией. Градиент остаточных напряжений разблокирует таким образом, перераспределяет и запирает водород по распределению (4), создавая в приповерхностных слоях проволоки более высокую его концентрацию. Это является причиной сни-

жения технологической прочности при испытаниях на осадку.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Физика и механизм волочения и объемной штамповки / Под ред. В.Е. Громова, Э.В. Козлова. М.: Недра, 1997. 293 с.
2. Морозов А.Н. Водород и азот в стали. М.: Metallurgy, 1968. 280 с.
3. Полторацкий Л.М., Громов В.Е., Чинкалов В.Я. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1991. № 4. С. 56-58.
4. Полторацкий Л.М., Громов В.Е., Базайкин В.И. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1994. № 2. С. 84-85.
5. Кузнецов Д.С. Специальные функции. М.: Высш. шк., 1965. 420 с.

УДК 548.4:539.26:669.221

### ВЛИЯНИЕ ДИСКЛИНАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ, ИМЕЮЩИХ РОСТОВОЕ ПРОИСХОЖДЕНИЕ, НА МЕХАНИЗМ ДЕФОРМАЦИИ ЭЛЕКТРООСАЖДЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

© А.А. Викарчук, А.Ю. Виноградов\*, А.Ю. Крылов\*\*

*Россия, Тольятти, Политехнический институт*

*\*Япония, Осака, Университет*

*\*\*Россия, Тольятти, Волжский автомобильный завод*

Vikarchuk A.A., Vinogradov A.Yu., Krylov A.Yu. Influence of the disclination type defects, having non-deformation origin, on deformation mechanism of elektro-deposited metals. The article deals with analysis of deformation stages of the materials, having disclinations types defects in there structure. The deformation curve specific features of such materials are discussed.

В работе [1] показано, что дефекты дисклинационного типа: оборванные субграницы, диполи частичных дисклинаций (ДЧД), полосы переориентации (ПП) обычно появляются лишь при больших ( $\varepsilon \approx 1$ ) степенях деформации, при этом реализуется ротационный механизм деформации. Для этого случая авторы [2] разработали дисклинационную модель распространения полос разориентации, согласно которой перемещение диполей частичных дисклинаций (незавершенной ПП) представляет собой лавинообразный процесс, связанный с коллективными переходами дислокаций из объема в плоскости залегания частичных дисклинаций.

Из теории [2] следует, что активными будут лишь диполи, для которых выполняется условие:  $\omega < b\rho_0\lambda$ , где  $b$  – вектор Бюргера дислокаций,  $\rho_0$  – их плотность перед фронтом полосы,  $\lambda$  – длина свободного пробега дислокаций, ( $\lambda \approx a$ ),  $2a$  – плечо диполя. При недостаточной плотности ( $\rho_0 < 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) полоса стопорится, дальнейшее повышение  $\rho_0$  в процессе деформации снова инициирует лавинообразную перестройку хаотической структуры в более упорядоченную. Диполи перемещаются по механизму «скачков», вызывая переориентацию участков кристалла, при этом микротвердость, дисперсия упругой деформации, интенсивность рентгеновских линий периодически меняются [3].

Представляло значительный научный интерес проверить эту гипотезу на электролитических меди и никеле, в которых уже в процессе электрокристаллизации формируются дефекты дисклинационного типа [4].

Как показали механические испытания [5], для всех образцов меди и никеля, не имеющих субструктуры и имеющих исходную субзеренную или двойниковую

субструктуру, деформация растяжения протекает в три стадии (II, III, IV).

Если же в исходной структуре имеются оборванные границы, дипольные конфигурации из них, незавершенные ПП (рис. 1), то на кривой нагружения появляется пятая стадия упрочнения с малым переходным участком и весьма низким и практически постоянным коэффициентом упрочнения. Наличие дефектов дисклинационного типа в исходной структуре (рис. 1) приводит к заметным изменениям закономерностей излучения акустоэмиссии (рис. 2). Вместо плавной кривой с максимумом в начале третьей стадии упрочнения наблюдается случайный импульсный поток, во-первых, меньшей интенсивности, во-вторых, существенно большей дисперсии скорости счета, что проявляется в виде острых пиков на акустограммах (рис. 2).

Сравнение экспериментального и теоретического законов распределения осуществлялось по критерию  $\chi^2$  [6].

Оценку автокорреляционной функции (АКФ) проводили по правилу

$$R_{nn}(\tau) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K [N(t_j) - \bar{N}][N(t_j + \tau) - \bar{N}],$$

где  $N(t_j)$  – число импульсов на временном интервале  $j$ ;

$\bar{N}$  – среднее число импульсов в реализации. Нормированные АКФ  $r(\tau)$  (рис. 2) получали как  $r(\tau) = R_{nn}(\tau)/R_{nn}(0)$ . Форма АКФ, соответствующая третьей

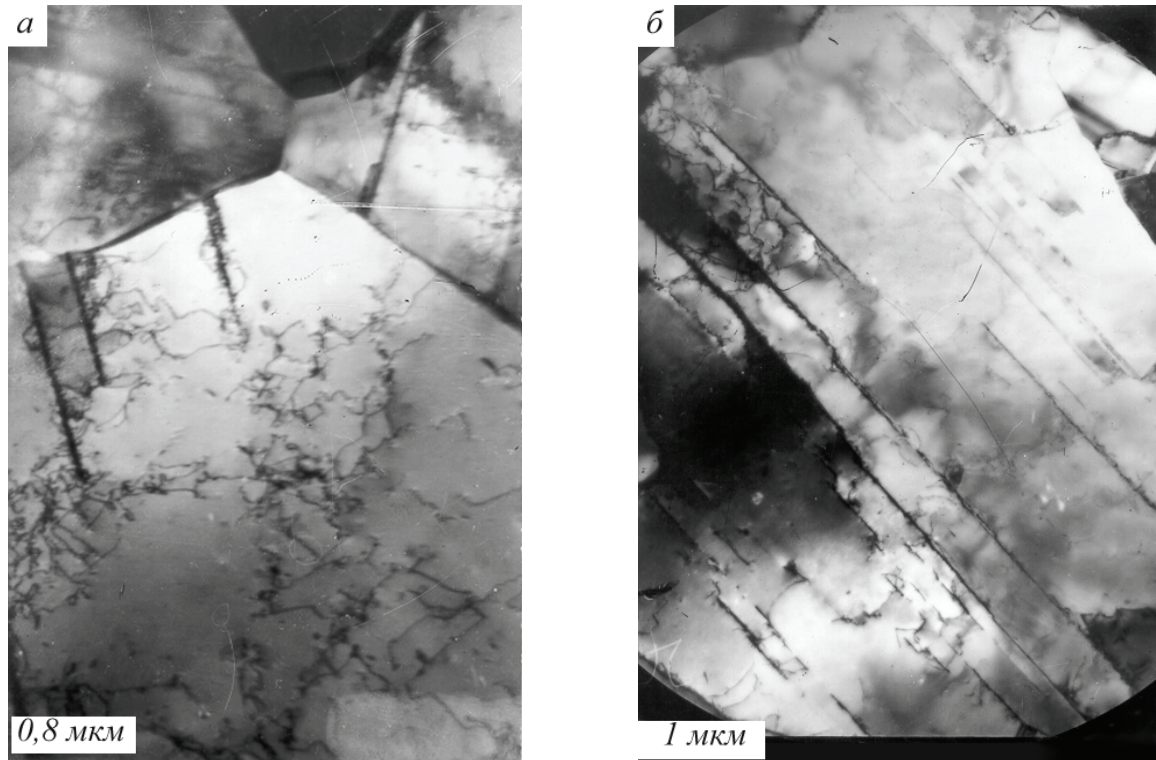


Рис. 1. Полосы переориентации, оборванные границы и дипольные конфигурации из них, имеющие ростовое происхождение: а) никель, б) медь

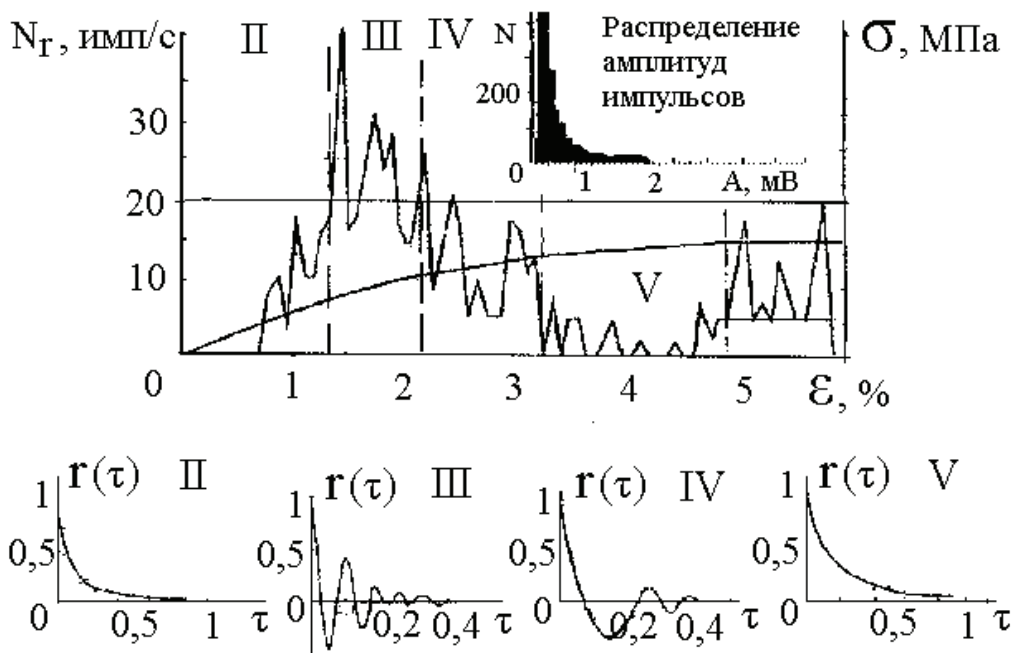


Рис. 2. Акустико-эмиссионный анализ дислокационно-дислокационной структуры электроосажденного никеля в процессе деформации

и четвертой стадиям, может быть приближенно описана законом:

$$r(\tau) = r_0 \cdot \exp(-\tau/\tau_0) \cdot \cos(\omega\tau),$$

где  $\tau_0$ ,  $\omega$  – константы. Причем  $\tau_0$  описывает скорость спада АКФ, а  $\omega$  – частоту осцилляций около оси

абсцисс. Такой закон изменения АКФ хорошо известен и описывает частотно-модулированные случайные процессы [6].

Параметры АКФ вычислялись с применением методов нелинейной регрессии. Для кривой III –  $\tau_{01} = 0,16$  с,  $\omega_1 = 55$  Гц; для IV –  $\tau_{02} = 0,16$  с;  $\omega_2 = 18$  Гц. На пятой стадии (рис. 2), как и предполагалось, никаких особен-

ностей АКФ не обнаруживается и АКФ типична для пуассоновского процесса  $r(\tau) = r_0 \cdot \exp(-\tau/\tau_0)$  с параметром  $\tau_0 = 0,16$  с, мало меняющимся от времени.

С учетом описанных выше особенностей структуры исследуемых материалов можно предложить следующую интерпретацию.

Наличие резких пиков АЭ и высокая коррелированность излучения на третьей стадии упрочнения (рис. 2) обусловлены упорядоченным процессом лавинообразного нарастания свободных дислокаций в результате распада нестабильных субграниц (рис. 1б). Увеличение числа свободных дислокаций в пределах зерна при наличии неравновесных, дисклинационных диполей (ДД) (существенно более устойчивых, чем оборванные субграницы) может инициировать их движение, которое происходит с некоторой временной задержкой  $\tau_i$ . Этим можно объяснить периодичность излучения, проявляющуюся в модуляции АКФ.

По структуре поля напряжений, упругой энергии ДД (рис. 1) можно уподобить сверхдислокации с вектором Бюргерса  $\mathbf{B} = 2[\mathbf{a}, \omega]$ . Поэтому для оценки возможной деформации, обусловленной движением ДД, можно воспользоваться уравнением Бейли – Орована  $\epsilon = \rho \mathbf{B}L$ , где плотность дислокаций  $\rho$  заменяется плотностью дисклинационных диполей  $\vartheta$ :  $\epsilon = 2a\omega\vartheta L$ . Для нашего случая  $\vartheta = 10^{11} \text{ м}^{-2}$ ,  $L = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ,  $2a = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  и  $\omega = 2 \cdot 10^{-3}$  имеем  $\epsilon = 6\%$ , что и наблюдается в экспериментах (рис. 2).

Перемещение ДД обеспечивает наблюдаемые на практике деформации, сопровождается мощным излучением сигналов АЭ, приводит к появлению внутри кристаллов переориентированных участков, а на поверхности грубых следов скольжения. Так как движение диполей в основном осуществляется за счет дислокаций, образовавшихся при распаде ростовых субграниц, а число диполей ограничено, то к концу четвертой стадии деформации (рис. 2) ротационный механизм исчерпывает свои возможности, активность АЭ падает практически до нуля и появляется пятая стадия упрочнения.

Таким образом, процесс пластической деформации электроосажденных меди и никеля, имеющих уже в исходном состоянии дефекты дисклинационного типа (оборванные субграницы, диполи из них, незавершенные ПП), может быть описан так. На второй стадии деформации (рис. 1а) под действием внешних и внутренних напряжений распадаются неустойчивые, в первую очередь оборванные и слабо разориентированные дислокационные субграницы. Плотность дислокаций в объеме порядка  $8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ , упрочнение обусловлено взаимодействием подвижных дислокаций со слоями и стенками.

На третьей стадии продолжают распадаться более устойчивые, разориентированные субграницы, начинается поперечное скольжение, плотность дислокаций достигает  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Этого достаточно, чтобы начали формироваться разориентированные ячейки (блоки) и перемещаться имеющиеся в исходной структуре ДД, с образованием ПП (рис. 1б). Развал границ и перемещение диполей связаны с коллективными дислокационными перестройками и сопровождаются всплесками АЭ на фоне непрерывного излучения (рис. 2). На третьей и четвертой стадиях деформации трансляционные и ротационные моды деформации действуют совместно. Угол разориентировки границ раздела растет. Упрочнение связано с взаимодействием дефектов на разных масштабных уровнях: дислокации взаимодействуют с дефектами дисклинационного типа.

Деформирующее напряжение  $\sigma$  будет зависеть от средней мощности дисклинационных дефектов [1]:

$$\sigma \approx \beta G \omega(\epsilon).$$

К концу четвертой стадии практически все неустойчивые границы уже распадаются и активность ростовых диполей падает. Поскольку деформация еще мала ( $< 10\%$ ), она не может обеспечить воспроизводство дислокаций, необходимых для активизации движения оставшихся и появления новых ДД. Поэтому ротационный механизм деформации при умеренных температурах перестает работать, материал не способен рассеивать поступающую упругую энергию и разрушается. Вероятно, если создать условия для дальнейшего повышения плотности дислокаций (деформировать в условиях сжатия при повышенных температурах), то можно снова активизировать ротационные дефекты и перейти в колебательный режим деформации [3].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 231 с.
2. Владимиров В.И., Романов А.Е. Дисклинации в кристаллах. Л.: Наука, 1986. 224 с.
3. Барахтин Б.К. и др. Периодичность структурных изменений при ротационной пластической деформации // ФММ. 1987. Т. 63. Вып. 6. С. 1185-1191.
4. Викарчук А.А., Валенко А.П., Юрченко С.А. Дефекты дисклинационного типа в структуре электроосажденных ГЦК-металлов // Электрохимия. 1991. Т. 27. Вып. 5. С. 589-596.
5. Викарчук А.А. Структуры, формирующиеся при электрокристаллизации ГЦК-металлов, и их эволюция в температурных и силовых полях: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. С.-Пб., 1999. 38 с.
6. Виноградов А.Ю. Акустико-эмиссионный анализ неомогенной пластической деформации аморфных металлов: Дис. ... канд. физ.-мат. наук / ФТИ. Л., 1988. 190 с.