

PACS: 62.90.+k

О.И. Дацко, В.С. Абрамов

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСОВ СЛАБОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕССЫ МИКРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ДЕФОРМАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ

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

Исследовалось влияние импульсов слабого магнитного поля (ИСМП) на характер процессов микропластической деформации (МПД) и деформационного старения (ДС) материала с помощью метода низкочастотного внутреннего трения (ВТ).

Полученные ранее результаты [1–4] показали, что уровни ВТ, измеренные в материале до (Q_1^{-1}) и после или во время (Q_2^{-1}) воздействия на него ИСМП, могут различаться (на 20–60%) либо совпадать в зависимости от структуры материала. Уровни ВТ различаются, когда дислокации взаимодействуют со стопорами, и совпадают, когда дислокации свободны от последних. Считается [2,5], что эффект воздействия ИСМП обусловлен реакцией примесно-дефектных комплексов (ПДК) типа дислокация–стопоры. В результате этой реакции изменяются характер и степень взаимодействия дислокаций со стопорами, что приводит к изменению уровня ВТ ($\Delta Q^{-1} = Q_2^{-1} - Q_1^{-1}$). Следует ожидать, что в результате механической, термической или другой обработки материала направленные изменения структурного состояния ПДК приведут к соответствующим изменениям величины разности рассматриваемых уровней ВТ (ΔQ^{-1}). По-видимому, кинетика поведения ΔQ^{-1} в этом случае может дать дополнительную информацию относительно изменений характера и степени взаимодействия дислокаций со стопорами, а также влияния ИСМП на структуру и свойства материала в процессе его различных обработок. С этих позиций подходящими объектами для исследований являются процессы МПД и ДС материала, во время которых в одном случае дислокации отрываются от стопоров (МПД), а в другом – закрепляются ими (ДС). Кроме того, вопрос о влиянии ИСМП на процессы МПД и ДС представляет самостоятельный интерес.

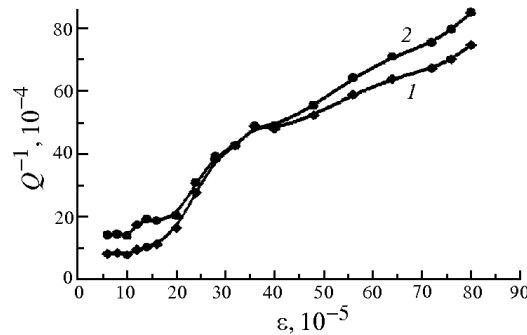
При решении поставленной задачи воздействие ИСМП на материал выполняли с амплитудой магнитного поля $\sim 3 \cdot 10^5$ А/м, длительностью переднего фронта импульса $\sim 10^{-4}$ с, частотой следования импульсов ~ 1 Нз, време-

нем воздействия порядка нескольких минут. Информацию о характере изменений дислокационной структуры материала получали с помощью низкочастотной установки ВТ типа обратного крутильного маятника с частотой около 1 Нз. Образцы для исследований в виде прямоугольных призм с размерами $3 \times 3 \times 60$ мм изготавливали путем механической обработки литых заготовок. Исследуемый образец являлся составной частью маятника, располагался в центре нагревательной печи, которая находилась внутри магнитного соленоида. Это позволяло без демонтажа образца осуществлять его МПД кручения, нагрев, воздействовать на него ИСМП, проводить измерения ВТ.

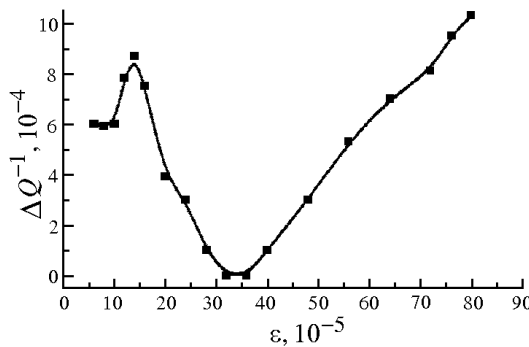
Исследования по МПД проводили на образцах из оловянистой бронзы (БрО12). Их деформацию осуществляли в интервале $(6-80) \cdot 10^{-5}$ путем ступенчатого увеличения амплитуды деформации ϵ при крутильных колебаниях маятника. Параллельно проводили измерения уровня ВТ в зависимости от задаваемой амплитуды деформации (по числу свободно затухающих колебаний за время уменьшения амплитуды деформации на 25–45%).

Время изменения уровня ВТ не превышало 1 мин, а всей амплитудной зависимости – 20 мин. Погрешность измерений составляла около 5%. Вначале проводили измерения амплитудной зависимости ВТ в обычных условиях (Q_1^{-1}), а затем – под воздействием на материал ИСМП (Q_2^{-1}). Последние измерения выполняли через несколько суток после первых, когда структурное состояние материала становилось аналогичным исходному.

На рис. 1,а представлены результаты измерений амплитудных зависимостей уровня ВТ. Зависимости имеют обычный характер, описываемый известными механизмами МПД [6,7]. Сравнение показывает, что амплитудная зависимость ВТ в условиях воздействия на материал ИСМП отличается от таковой при МПД в обычных условиях (кривая 1). Это проявляется в возникновении более высокого уровня ВТ (за исключением района амплитуд $\epsilon \approx \epsilon_c'' \approx 36 \cdot 10^{-5}$), понижении значения



а



б

Рис. 1. Амплитудная зависимость: а – уровня ВТ (в бронзе) в обычных условиях – Q_1^{-1} (1) и в условиях воздействия на материал ИСМП – Q_2^{-1} (2); б – разности уровней ВТ $\Delta Q^{-1} = Q_2^{-1} - Q_1^{-1}$

первой критической амплитуды деформации ε'_c (с $13 \cdot 10^{-5}$ до $10 \cdot 10^{-5}$), в уменьшении угла наклона касательной к кривой $Q^{-1}(\varepsilon)$ на интервале $\varepsilon'_c < \varepsilon < \varepsilon''_c$ и его увеличении при $\varepsilon > \varepsilon''_c$.

Наблюдаемое в результате воздействия ИСМП повышение уровня амплитудно-зависимого ВТ (за исключением района амплитуд $\varepsilon \approx \varepsilon'_c$), наиболее вероятно, связано с происходящими при этом изменениями магнитоактивных состояний ПДК типа дислокация–стопоры [3,5]. Изменения эти таковы, что степень взаимодействия дислокаций со стопорами уменьшается. Отсутствие изменений уровня амплитудной зависимости ВТ в районе амплитуд деформаций $\varepsilon \approx \varepsilon''_c$ обусловлено тем, что новые дислокации, возникающие при этих деформациях в материале, в течение некоторого отрезка времени остаются незаблокированными стопорами, а следовательно, не реагируют на воздействие ИСМП [3,4].

На рис. 1,б приведена зависимость $\Delta Q^{-1} = Q_2^{-1} - Q_1^{-1}$ от амплитуды деформации. Как видим, ее величина в процессе МПД изменяется немонотонно, обнаруживая аномальное поведение угла наклона φ касательной к кривой $\Delta Q^{-1}(\varepsilon)$, которое сопровождается изменением знака $\text{tg}\varphi$ при переходе через точки экстремумов (максимума и минимума) на кривой ΔQ^{-1} и постепенно возрастающими по величине интервалами деформаций, соответствующими этим изменениям (за исключением интервала $\varepsilon \approx \varepsilon''_c$).

Наиболее вероятно, что поведение ΔQ^{-1} обусловлено изменением степени взаимодействия дислокаций со стопорами:

- сохранение уровня ΔQ^{-1} при $\varepsilon < \varepsilon'_c$ – сохранением степени взаимодействия при движении дислокационных сегментов, закрепленных на концах стопорами;

- увеличение уровня ΔQ^{-1} при $\varepsilon > \varepsilon'_c$ – повышением степени взаимодействия в процессе отрыва дислокационных сегментов от стопоров в условиях, когда с ростом амплитуды деформации постепенно преодолеваются более мощные стопоры;

- уменьшение уровня ΔQ^{-1} при $\varepsilon'_c < \varepsilon < \varepsilon''_c$ – наложением двух процессов (ослабевающего, связанного с отрывом дислокационных сегментов от стопоров, и усиливающегося, вызванного рождением новых дислокаций), в результате которого степень взаимодействия постепенно понижается. Этот процесс происходит с более высокой скоростью, чем предшествующий;

- сохранение уровня ΔQ^{-1} при $\varepsilon \approx \varepsilon''_c$ – отсутствием взаимодействия новых дислокаций со стопорами, когда в течение некоторого времени после МПД дислокации остаются незакрепленными стопорами. Очевидно, в этот момент МПД материал приобретает наиболее высокий уровень пластичности (или сверхпластичности);

- повышение уровня ΔQ^{-1} при $\varepsilon > \varepsilon''_c$ – увеличением степени взаимодействия. Этот процесс идет вначале со скоростью, характерной для процесса, имеющего место при $\varepsilon'_c < \varepsilon < \varepsilon''_c$, а затем его скорость монотонно уменьшается.

Исследования процесса ДС осуществляли на образцах цинка технической чистоты после МПД материала амплитудами деформаций $\varepsilon > \varepsilon_c''$, равными $1 \cdot 10^{-3}$ и $2 \cdot 10^{-3}$ с выдержкой в течение 4 min (при этом в материале возникала остаточная деформация, равная $5 \cdot 10^{-5}$). Вначале МПД выполняли в обычных условиях, а затем (через несколько дней, когда материал возвращался в исходное состояние) – под воздействием на материал ИСМП. После прекращения МДП колебания маятника гасили и проводили измерения уровня ВТ в амплитудно-независимой области ($\varepsilon \leq 2 \cdot 10^{-5}$). На все это уходило не более 1 min. Затем осуществляли измерения уровня ВТ в зависимости от времени (в течение 40–60 min).

На рис. 2,а представлены результаты измерений временных зависимостей уровня ВТ. Зависимости имеют обычный характер [6], обусловлены процессами возврата и ДС [6,7], описываются известным [3,5] аналитическим выражением $Q_t^{-1} = Q_\infty^{-1} + [Q_0^{-1} - Q_\infty^{-1}] \exp(-t/\tau)^m$. Сравнение (кривые 1, 2) показывают, что временная зависимость уровня ВТ после МПД в условиях воздействия на материал ИСМП отличается от временной зависимости уровня ВТ после МПД в обычных условиях. Это проявляется в более высоком уровне ВТ, более слабом и более продолжительном уменьшении уровня ВТ с течением времени.

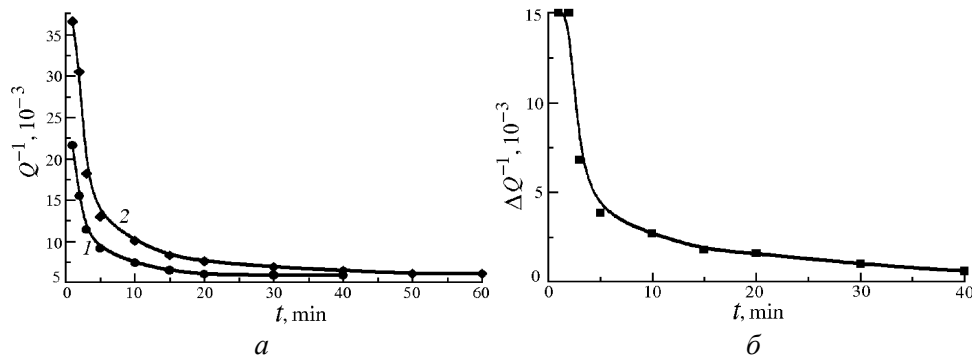


Рис. 2. Временная зависимость: а – уровня (амплитудно-независимого) ВТ (в цинке) после МПД материала в обычных условиях – Q_1^{-1} (1) и под воздействием на материал ИСМП – Q_2^{-1} (2); б – разности уровней ВТ $\Delta Q^{-1} = Q_2^{-1} - Q_1^{-1}$

Наблюдаемое в результате воздействия ИСМП повышение уровня ВТ, очевидно, обусловлено той же причиной, что была указана выше, в случае исследования МПД материала.

Зависимость ΔQ^{-1} от времени приведена на рис. 2,б. Ее величина в процессе возврата и ДС материала изменяется немонотонно. Наиболее вероятно, что поведение ΔQ^{-1} зависит от изменения степени взаимодействия дислокаций со стопорами. Так, сохранение уровня ΔQ^{-1} при $t \leq 2$ min обусловлено отсутствием этого взаимодействия, когда в течение некоторого времени после МПД дислокации остаются незакрепленными стопорами (напомним, что измерения уровня ВТ осуществляются в амплитудно-независимой области). Уменьшение уровня ΔQ^{-1} при $t > 2$ min связано с увеличением степени взаи-

модействия.

Сохранение уровня ΔQ^{-1} при $t < 2 \text{ min}$ имеет место тогда, когда уровни ВТ (Q_1^{-1} и Q_2^{-1}) резко уменьшаются с течением времени. Это свидетельствует о том, что в данных условиях в материале происходит резкое уменьшение плотности незаблокированных дислокаций, за которое, наиболее вероятно, ответственно явление возврата. Это положение позволяет считать, что процесс ДС в материале начинается через 2 min после МПД. В таком случае для $t_1 = 2 \text{ min}$ и $t_2 = 20 \text{ min}$ имеют место следующие экспериментальные значения уровня ВТ: $Q_0^{-1} = 150 \cdot 10^{-4}$; $Q_\infty^{-1} = 58 \cdot 10^{-4}$; $Q_{(2)}^{-1} = 108 \cdot 10^{-4}$; $Q_{(20)}^{-1} = 61 \cdot 10^{-4}$ (для ДС после МПД в обычных условиях – кривая 1 на рис. 2,а) и $Q_0^{-1} = 300 \cdot 10^{-4}$; $Q_\infty^{-1} = 60 \cdot 10^{-4}$; $Q_{(2)}^{-1} = 140 \cdot 10^{-4}$; $Q_{(20)}^{-1} = 73 \cdot 10^{-4}$ (для ДС после МДП в условиях воздействия ИСМП – кривая 2 на рис. 2,а). По этим значениям из выражений $m = \ln(\ln A_1 / \ln A_2) / \ln(t_1 / t_2)$ и $\tau^m = 4(t_1^m - t_2^m) / \ln(A_1 / A_2)$ (где $A = (Q_t^{-1} - Q_\infty^{-1}) / (Q_0^{-1} - Q_\infty^{-1})$) было соответственно получено, что $m_1 = 0.749$, $m_2 = 0.424$ и $\tau_1 = 24 \text{ min}$, $\tau_2 = 42 \text{ min}$.

Как видно, значения m у рассматриваемых процессов ДС отличаются от единицы. Это говорит о том, что каждый из них не описывается временной зависимостью типа экспоненты и одним механизмом. Более того, сами процессы отличаются друг от друга различными временными зависимостями, близкими к степенным, с различными временами релаксации, что свидетельствует в пользу представлений о наличии состояний с фрактальной структурой. Наиболее вероятно, что такое положение обусловлено наличием различных структурных состояний дислокаций или ансамбля дислокаций, возникших в материале после его МПД в обычных условиях и в условиях воздействия на материал ИСМП.

В этом случае в материале в результате МПД с $\epsilon > \epsilon_c''$ в условиях ИСМП должно возникать другое, новое структурное состояние ансамбля дислокаций и значений его параметров, в частности величины энергии активации движения дислокаций относительно исходного структурного состояния. Для проверки данного положения использовался следующий прием.

Как известно [6–8], уровень ВТ релаксационной природы может быть представлен выражением $Q^{-1} \approx \omega\tau / (1 + \omega^2\tau^2)$, где $\tau = \tau_0 \exp(H/RT)$. В случае, если $\tau\omega \gg 1$, $Q^{-1} \approx 1/\tau\omega$, зависимость $\ln Q^{-1} \sim -H/RT$ должна представлять собой прямую линию. Тогда величина энергии активации может быть найдена путем измерения уровня ВТ при различных температурах нагрева материала T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$) и расчета по формуле

$$H/R = (\ln Q_2^{-1} - \ln Q_1^{-1}) / (1/T_1 - 1/T_2).$$

При рассмотрении этого вопроса МПД материала в условиях воздействия ИСМП осуществляли при 20; 80; 140 и 200°C. Уровень ВТ измеряли в амплитудно-независимой области при различных температурах нагрева материала после его МПД. Каждое новое измерение уровня ВТ выполняли через некоторое время после МПД материала (1–2 дня) с целью снятия внутренних на-

пряжений, возникающих в материале в результате его МПД.

Исследования показали, что уровень ВТ в исходном материале составляет $6.8 \cdot 10^{-3}$, после МПД с $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$ – соответственно $11.3 \cdot 10^{-3}$ и $21.5 \cdot 10^{-3}$, а в условиях воздействия ИСМП – $15 \cdot 10^{-3}$ и $36.5 \cdot 10^{-3}$.

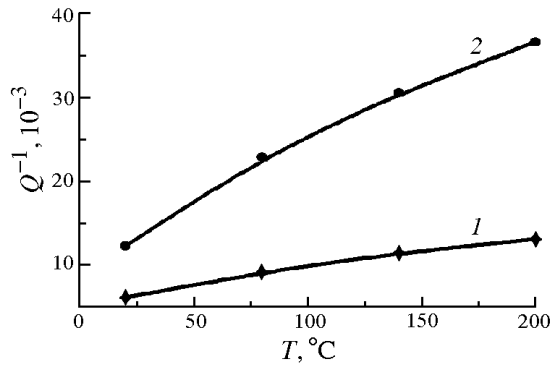


Рис. 3. Температурная зависимость уровня (амплитудно-независимого) ВТ (в цинке): 1 – в исходном материале, 2 – после МПД материала в условиях воздействия ИСМП

риале (до МПД) и $H = 0.06$ eV в материале, претерпевшем МПД в условиях воздействия ИСМП. Этот результат свидетельствует в пользу высказанного выше положения.

С ростом температуры нагрева уровень ВТ в материале в исходном состоянии (до МПД) и после МПД в условиях воздействия ИСМП монотонно повышается, обнаруживая более интенсивные изменения после МПД материала (рис. 3).

Полученные зависимости в координатах $\ln Q^{-1} \approx -H/RT$ имели линейный характер. Расчетные значения энергии активации движения дислокаций оказались равными $H = 0.05$ eV в исходном материале

Выводы

1. Показано, что влияние ИСМП на структуру и свойства ПДК материала типа дислокация–стопоры зависит от степени взаимодействия дислокаций со стопорами и имеет экстремальный характер. Это положение позволяет предполагать, что влияние ИСМП на структуру и свойства ПДК материала типа дислокация–стопоры будет иметь экстремальный характер также в зависимости от различных режимов и условий воздействия ИСМП на материал.

2. Воздействие ИСМП на материал в процессе его МПД оказывает влияние на кинетику процесса МПД и кинетику последующего процесса – ДС материала.

1. О.И. Дацко, В.И. Алексеенко, А.Д. Шахова, ФТТ **38**, 1799 (1996).
2. О.И. Дацко, В.И. Алексеенко, ФТТ **39**, 1234 (1997).
3. О.И. Дацко, В.И. Алексеенко, В.Н. Варюхин, Металлофизика и новейшие технологии **21**, № 10, 60 (1999).
4. О.И. Дацко, ФТТ **44**, 289 (2002).
5. С.Н. Постников, В.П. Сидоров, А.Б. Иляхинский и др., в сб.: Прикладные проблемы прочности и пластичности, статика и динамика деформируемых систем, Горьковский ун-т, Горький (1980), с. 138.
6. В.С. Постников, Внутреннее трение в металлах, Металлургия, Москва (1974).
7. М.А. Кристал, С.А. Головин, Внутреннее трение и структура металлов, Металлургия, Москва (1976).
8. Кэ. Тин-суй, в сб.: Упругость и неупругость металлов, Иностранная литература, Москва (1954), с. 237.

O.I. Datsko, V.S. Abramov

INFLUENCE OF WEAK MAGNETIC FIELD PULSES
ON MICROPLASTIC DEFORMATION
AND DEFORMATION AGING PROCESSES

The low-frequency internal friction method has been used to investigate the influence of weak magnetic field pulses on the character of microplastic deformation, aging processes in materials.

Fig. 1. The amplitude dependence of: a – the internal-friction level (in bronze) in normal conditions – Q_1^{-1} (1) and under the influence of weak magnetic field pulses (WMFP) – Q_2^{-1} (2); δ – the difference of internal friction levels $\Delta Q^{-1} = Q_2^{-1} - Q_1^{-1}$

Fig. 2. The time dependence of: a – the level (amplitude-independent) of internal friction (in zinc) after the microplastic deformation under normal conditions – Q_1^{-1} (1) and in conditions of WMFP effect – Q_2^{-1} (2); δ – the difference of internal friction levels $\Delta Q^{-1} = Q_2^{-1} - Q_1^{-1}$

Fig. 3. The temperature dependence of the level (amplitude-independent) of internal friction (in zinc): 1 – in original material, 2 – past the microplastic deformation under the influence of WMFP