

УДК: 669.3:539.374

PACS: 62.20.Fe:81.40.-Z

Влияние периодических колебаний на немонотонную ползучесть свинца

Т.Т. Могильникова

*Национальный Научный Центр «Харьковский физико-технический институт»,
ул. Академическая, 1, Харьков, 61108, Украина*

При одновременном измерении деформации неравномерной ползучести и внутреннего трения обнаружено немонотонное изменение параметров ступенчатого процесса ползучести поликристаллического свинца под влиянием знакопеременного напряжения различной частоты. Установлена взаимосвязь между деформационными ступеньками и внутренним трением. Изменение внутреннего трения в процессе ползучести объясняется периодическим размножением дислокаций, обусловленным процессом диффузионного перераспределения подвижных точек закрепления вдоль дислокации под влиянием внешнего напряжения.

Ключевые слова: деформация, ползучесть, внутреннее трение, дислокации, напряжение.

При одночасному вимірюванні деформації нерівномірної повзучості і внутрішнього тертя виявлено немонотонна зміна параметрів ступінчастого процесу повзучості полікристалічного свинцю під впливом знакозмінного напруження різної частоти. Встановлено взаємний зв'язок між деформаційними ступенями і внутрішнім тертям. Зміна внутрішнього тертя в процесі повзучості пояснюється періодичним розмноженням дислокацій, обумовленим дифузійним перерозподілом рухливих точок закріплення вздовж дислокації під впливом зовнішнього напруження.

Ключові слова: деформації, повзучість, внутрішнє тертя, дислокації, напруження.

During simultaneous measuring of the deformation step creep and internal friction have revealed non-monotonous the change of parameters of the step creep of polycrystalline lead under influence of periodic strain has been. Established connection between of deformation step creep and internal friction. Change of the internal friction in processes of the step dislocations because of diffusive redistribution processes of pinning points on dislocation line under the external stresses.

Keywords: deformation, creep, internal friction, dislocations, stresses.

Введение

Неравномерность деформации металлов, проявляющаяся при постоянной нагрузке, зависит от многих факторов: напряжения, температуры, предварительной деформации [1], состава материала [2], микроструктуры [1,3], состояния поверхности [4], ориентации кристалла [5], магнитного поля [6]. Известно, что при периодическом нагружении могут изменяться различные свойства материала. Экспериментально установлено, что приложение переменных напряжений приводит к ускорению процессов релаксации. Переменные напряжения могут вызвать полную релаксацию внутренних напряжений, при которых степень термически активируемого возврата незначительна. Остаточная деформация после испытания на микроползучесть кручением поликристаллического цинка при комнатной температуре полностью снималась при приложении относительно небольшого переменного напряжения [7]. В монокристаллах степень возврата настолько мала, что не всегда может быть обнаружена

экспериментально. Мелека и Данн установили также, что заметный возврат в монокристаллах цинка, испытанных на ползучесть при комнатной температуре, может произойти только при приложении циклических напряжений. В некоторых материалах процесс релаксации напряжений происходит не за счет снятия деформации (возврата), а путем рекристаллизации.

Гринвуд [8], изучая ползучесть свинца, обнаружил, что при наложении переменных колебательных напряжений рекристаллизация в процессе ползучести происходит при меньшей величине деформации. Кеньон [8] показал, что зерна меди после рекристаллизации при циклическом нагружении имели твердость в 2 раза ниже, чем до рекристаллизации. Полаковский [9] установил, что при знакопеременном нагружении образцов меди, никеля, алюминия твердость уменьшалась. Нэвил и Броцен [8] наблюдали снижение предела текучести малоуглеродистой стали под действием сравнительно небольшого переменного напряжения. Величина снижения пропорциональна амплитуде напряжения. Аналогичный результат был получен на монокристаллах цинка Блахой и Лангенской

[8]. Под влиянием периодических напряжений происходило увеличение скорости ползучести свинца [8], алюминия, меди, серебра платины [10]. В работе [15] исследовалось влияние амплитуды напряжения затухающих крутильных колебаний на ползучесть меди. Авторы работ [10,11,12] изучали внутреннее трение металлов в процессе ползучести.

В работе [13] в интервале сдвиговых напряжений 0,82...8,01 МПа при комнатной температуре был обнаружен немонотонный характер микроползучести свинца. На кривой ползучести появлялись деформационные ступеньки протяженностью в несколько минут. Работы, в которых рассматривается влияние периодических напряжений на немонотонную ползучесть, автору не известны.

В настоящей работе исследуется действие низкочастотных периодических колебаний на параметры немонотонной ползучести, а также взаимосвязь немонотонной ползучести с внутренним трением.

Методика эксперимента

В работе использовались образцы, изготовленные из свинца чистоты 99,98%. Проволочные образцы диаметром 2,9 мм, длиной рабочей части 60 мм получали путем выдавливания на прессе при помощи матрицы и пуансона. Образцы отжигались при 160°C в течение двух часов в вакууме. Средний размер зерна после отжига составлял 20-25 мкм. Исследования проводились при комнатной температуре ($0,5 T_{пл}$) на установке, позволяющей одновременно измерять ползучесть и внутреннее трение в условиях действия сдвиговых напряжений [14]. Напряжение ползучести было ниже предела текучести и составляло 2,04 МПа. Деформация определялась при помощи зеркальной системы, разрешающая способность которой была $6,6 \cdot 10^{-7}$ отн.ед. Внутреннее трение измерялось в амплитуднонезависимой области. Максимальный сдвиг на поверхности образца, возникающий под действием периодических колебаний, равнялся $7 \cdot 10^{-6}$ отн.ед., что соответствует амплитуде напряжения 0,042 МПа. Частота колебаний изменялась в пределах 0,79-4,6 кол/с. Кривые внутреннего трения фиксировались на движущейся фотопленке осциллографа Н-102. Измерения проводили в течение 1 часа.

Результаты опытов и их обсуждение

В результате проведенных опытов установлено, что низкочастотные периодические напряжения приводят к изменению основных параметров немонотонной ползучести, описанных в работе [13] (рис.1, кр.1).

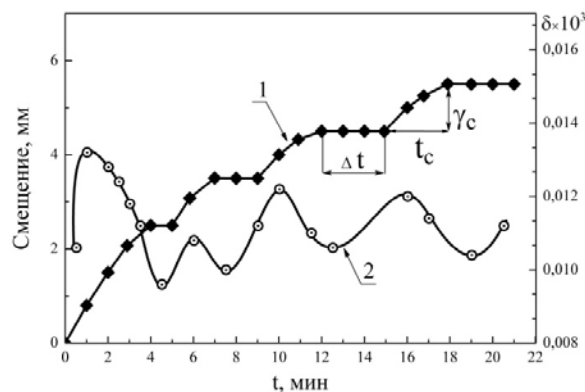


Рис.1. Кривые ползучести (1) и внутреннего трения (2) свинца.

I.

1. Скорость ползучести при наложении периодических колебаний ($\tilde{\epsilon}$) значительно возрастает по сравнению со скоростью ползучести в условиях постоянно действующего напряжения.

2. Время до появления первой ступеньки на кривой ползучести («инкубационный период») меняется в зависимости от частоты крутильных колебаний немонотонно (рис.2), наибольшее значение t_0 наблюдается при $\nu=0,79$ кол/с. С повышением частоты колебания t_0 резко снижается (в 3 раза), при частоте $\sim 3,3$ кол/с t_0 приобретает минимальное значение и снова возрастает. Время инкубационного периода при $\nu \approx 3,3$ кол/с снижается по сравнению с t_0 при $\tilde{\epsilon} = 0$ от 400 до 300 с.

3. Зависимость длины участков кривой ползучести Δt (отрезок времени между двумя соседними ступеньками) носит немонотонный характер, в интервале частот 0,79...4,65 кол/с Δt достигает максимального значения при $\nu \sim 3,3$ кол/с (рис.3) и составляет 198 сек. При напряжении 2,04 МПа и $\tilde{\epsilon} = 0$ при одном и том же времени от начала ползучести $\Delta t = 125$ сек.

4. Протяженность ступеньки t_c при увеличении частоты колебаний от 0,79 до 3,3 кол/с растет от 60 сек при $\nu=0,79$ кол/с до 180 сек при $\nu \approx 3,3$ кол/с, затем снижается (рис.4).

5. Высота ступеньки γ_c в диапазоне частот 0,79... $\sim 3,3$ кол/с возрастает от $0,5 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-6}$, вслед за тем снижается (рис.5). Без периодических напряжений при $\tau = 2,04$ МПа высота ступеньки была 10^{-6} [13], и только при достижении напряжения 3,50 МПа и более величина $\gamma_{ст.}$ составляет $2 \cdot 10^{-6}$ [13].

6. Количество ступенек n , рождающихся в процессе ползучести под влиянием переменных напряжений за одинаковый период времени (1 час), немонотонно зависит от частоты колебаний (рис.6). Минимальное количество ступенек образуется при частоте $\sim 3,3$ кол/с. Однако ступеньки, возникшие

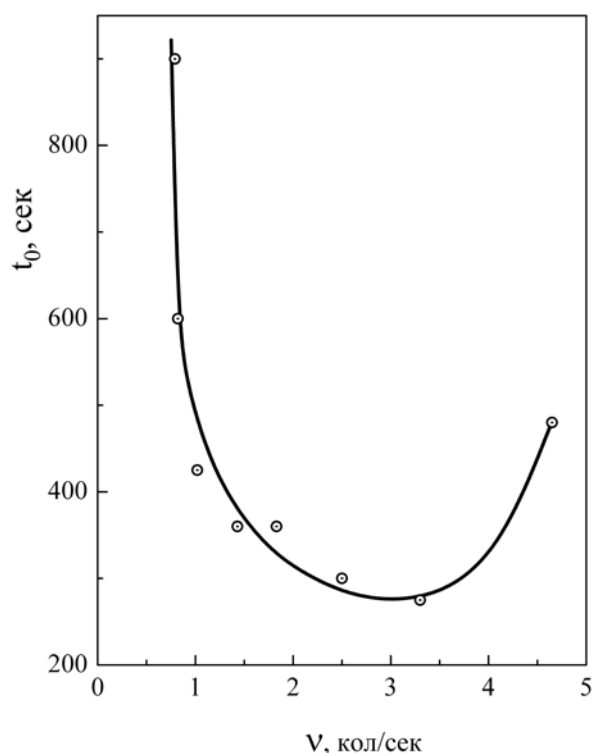


Рис.2 Зависимость “инкубационного периода” t_0 от частоты колебания v .

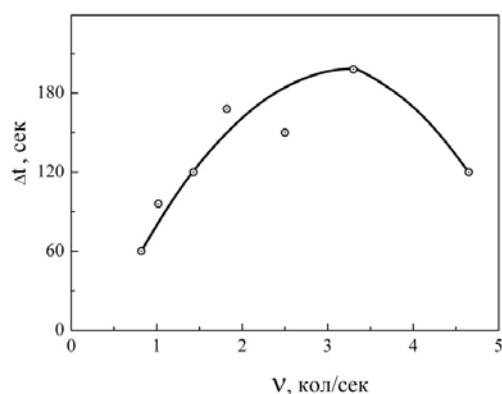


Рис.3. Зависимость Δt от частоты колебания v .

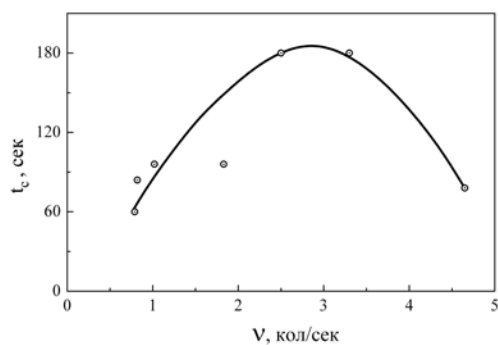


Рис.4. Зависимость t_c от частоты колебания v .

при этой частоте, характеризуются максимальной протяженностью и высотой (рис.4, 5).

Возрастание скорости ползучести свинца при действии циклических напряжений ранее наблюдалась в работах Гринвуда и Кеннеди [8]. Кеннеди, исследуя ползучесть свинца при статическом нагружении при 32°C показал, что дополнительное переменное напряжение увеличивает скорость ползучести в большей степени, чем дополнительное постоянное нагружение. Увеличение скорости ползучести при измерении низкочастотного внутреннего трения в режиме ползучести при температуре 0,5-0,6 $T_{пл}$ наблюдалось в ряде ГЦК металлов: Al, Cu, Ag, Pt [10,11]. В процессе ползучести поликристаллической меди при комнатной температуре (0,27 $T_{пл}$) в условиях одновременного действия растягивающих напряжений величиной 100 МПа и циклически изменяющихся напряжений с частотой 1 кол/с увеличение амплитуды крутильных колебаний от 10^{-4} до $8 \cdot 10^{-6}$ вызвало возрастание скорости деформирования пропорционально квадрату амплитуды колебания [15].

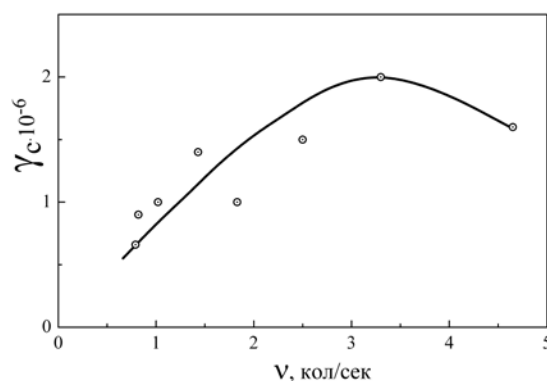


Рис.5. Зависимость γ_c от частоты колебания v .

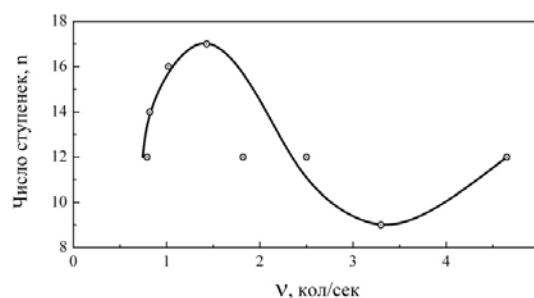


Рис.6. Зависимость числа ступенек n от частоты колебания v .

В работе [13] был сделан вывод о том, что немонотонность деформации микроползучести свинца связаны с размножением дислокаций. Активными источниками дислокаций могут служить отрезки дислокаций, свободные от точек закрепления, образовавшиеся вследствие процесса диффузионного

перераспределения подвижных точек закрепления вдоль дислокации, вызванного внешним напряжением. Если эффективная длина образовавшихся свободных сегментов сравнима с длиной источника Франка-Рида, источники дислокаций активируются.

Периодические напряжения, приложенные к образцу при одновременном действии постоянного напряжения, вносят в процесс перераспределения подвижных точек закрепления существенные изменения. При умеренно высоких температурах и низких частотах периодические колебания инициируют релаксационные потери, обусловленные тем, что движение подвижных точек закрепления вдоль дислокации происходит не в фазе с приложенным напряжением. Потери упругой энергии в этом случае характеризуются релаксационным пиком [16]. Этот релаксационный процесс, вероятно, определяет немонотонную частотную зависимость параметров неравномерной ползучести, проявляющуюся в виде деформационных ступенек.

Ранее в работе [17] установлено, что при наличии дополнительных монотонно возрастающих в пределах макроупругости напряжений затухание периодических колебаний увеличивается. Дополнительное затухание ($\delta_{пл}$) связано с микропластической деформацией, обусловленной образованием новых дислокаций [18]. Величина $\delta_{пл}$ немонотонно зависит от частоты колебаний и достигает максимального значения при частоте $\sim 3,3$ кол/с при комнатной температуре [19]. То обстоятельство, что максимум $\delta_{пл}$ и максимальные значения параметров Δt , t_c и γ_c наблюдаются в обоих случаях при комнатной температуре и одной и той же частоте колебания $\sim 3,3$ кол/с свидетельствует о том, что физическая природа этих пиков одинакова. Немонотонность деформации микроползучести свинца (деформационные ступеньки) и микропластическая деформация при совместном воздействии на образец периодических и монотонно возрастающих напряжений, проявляющаяся в возрастании внутреннего трения ($\delta_{пл}$), в том и другом случае вызваны размножением дислокаций.

II.

Внутреннее трение в процессе немонотонной ползучести изменяется сложным образом (рис.1, кр.2). На стадии неустановившейся ползучести внутреннее трение резко возрастает, затем резко снижается и к началу установившейся ползучести приобретает минимальное значение. На стадии установившейся ползучести наблюдается немонотонное изменение величины внутреннего трения в виде периодически появляющихся пиков. На участках кривой ползучести с повышенной скоростью (ступеньки) внутреннее трение растет. При переходе от ступеньки к участкам с постоянной скоростью ползучести происходит резкое

уменьшение величины внутреннего трения. Пик внутреннего трения на начальной стадии ползучести, по-видимому, вызван «мгновенной деформацией» (предварительная деформация), возникающей под действием приложенной нагрузки. Так как немонотонность микроскопической деформации (ступеньки) в условиях ползучести связана с работой активных источников дислокаций, можно сделать вывод о том, что периодическое изменение внутреннего трения обусловлено размножением дислокаций.

Пик внутреннего трения на стадии неустановившейся ползучести наблюдали авторы работы [10] для никеля марки МП-2 при температуре 550°C ($0,5T_{пл}$) и сплава МНЦ-2,5 при температуре $550-700^\circ\text{C}$ ($0,5-0,56T_{пл}$) при напряжении растяжения 39 МПа. На стадии установившейся ползучести уровень амплитуднонезависимого внутреннего трения практически не изменялся вплоть до наступления стадии ускоренной ползучести. Наибольшее значение внутреннего трения и затем резкое снижение на первой стадии ползучести, в условиях растягивающего напряжения отмечалось в работе [11] для Al и Ag при температуре $0,35T_{пл}$ и $0,6T_{пл}$ при напряжениях 12,5 МПа и 38 МПа соответственно. В течение установившейся ползучести внутреннее трение при малых амплитудах колебания ($10^{-6}-10^{-5}$) практически оставалось постоянным. При напряжении периодических колебаний более 10^{-5} внутреннее трение возрастало. В интервале частот $\omega=0,5-2,5$ кол/с внутреннее трение изменялось пропорционально $\sim \omega^{-1}$.

Амплитуднонезависимое внутреннее трение хорошо отожденного йодидного циркония в процессе ползучести при частоте периодических колебаний 0,5-2,5 кол/с при комнатной температуре ($\sim 0,27T_{пл}$) при растягивающем напряжении ниже предела текучести оставалось неизменным, равным внутреннему трению ненагруженного образца. При напряжениях, несколько превосходящих предел текучести (118-179 МПа), на начальном участке ползучести внутреннее трение характеризовалось наибольшим значением, затем происходило снижение. На стадии установившейся ползучести при малых скоростях деформирования внутреннее трение не изменялось. При скоростях, превосходящих определенную величину $\epsilon_{кр}$, внутреннее трение возрастало приблизительно пропорционально скорости деформирования. Удлинение образца при этом было неравномерное, прерывистое.

Неизменный уровень внутреннего трения при малых скоростях деформирования авторы связывали с перемещением дислокаций вместе с атмосферой примесных атомов. Возрастающий уровень внутреннего трения объяснили отрывом дислокаций от атмосфер и активизацией источников Франка-Рида. Частотная зависимость внутреннего трения в интервале 0,5-2,5 кол/с отсутствовала [12].

Выводы

Немонотонный характер параметров ползучести от частоты крутильных колебаний связан с релаксационным процессом внутри ядра дислокации, происходящим под действием знакопеременных напряжений.

Периодическое изменение внутреннего трения в процессе немонотонной ползучести связано с размножением дислокаций, обусловленным перераспределением подвижных точек закрепления вдоль дислокации под влиянием приложенного напряжения.

Природа микропластических деформаций, обнаруживающихся в процессе немонотонной ползучести, возрастание внутреннего трения при действии на образец периодически изменяющегося и монотонно нарастающего в пределах макроупругости сдвигового напряжения, независимо от способа нагружения образца, обусловлена одним и тем же физическим процессом – размножением дислокаций.

1. Н.Н. Песчанская, В.В. Шпейзман, А.Б. Синани, Б.И. Смирнов // ФТТ, (2004), т.46, вып.11, с.1991-1995.
2. В.В. Шпейзман, Н.Н. Песчанская, Б.И. Смирнов // ФТТ, (1998), т.40, №4, с.690-693.
3. Н.Н. Песчанская, Б.И. Смирнов, В.В. Шпейзман // ФТТ, (2008), т.50, вып.5, с.815-819.
4. Л.Н. Загоруйко, А.Н. Осецкий, В.П. Солдатов // ФММ, (1977), т.43, вып.5, с.1079-1087.
5. В.И. Лихтман, Е.Д. Щукин, П.А. Ребиндер // Физико-химическая механика металлов. Москва: изд-во АН СССР, (1962), с.65-84.
6. Н.Н. Песчанская, Б.И. Смирнов, В.В. Шпейзман // ФТТ, (2008), т.50, вып.6, с.997-1001.
7. А.Н. Meleka, G.E. Dunn. // Journ. Instit. Metals, (1960), v.88, p.407-410.
8. А.Д. Кеннеди // Ползучесть и усталость в металлах, Из-во «Металлургия», (1965), 332 с.
9. Б.М. Кумицкий // Исследование ползучести методом внутреннего трения. Автореферат на соискание степени кандидата физико-математических наук, (1979).
10. В.П. Зубехин, П.Д. Новокрещенов, В.И. Попов, В.П. Максимов // Внутреннее трение в металлических материалах, Москва: «Наука», (1970), с.73-76.
11. В.П. Зубехин, Б.М. Кумицкий // Механизмы внутреннего трения в полупроводниковых и металлических материалах, Москва: «Наука», (1972), с.79-82.
12. А.И. Дашковский // Металлургия и металловедение чистых металлов, Москва: «Атомиздат», (1968), с.145-150.
13. Т.Т. Могильникова // ВАНТ, серия: Вакуум, чистые металлы, сверхпроводники, (2009), №6, с.42-46.
14. Р.И. Гарбер, Т.Т. Могильникова, Г.Г. Чечельницкий, В.И. Коваленко // Машины и приборы для испытания материалов, Москва: Металлургия, (1968), с.119-121.
15. В.С. Постников, А.Г. Косилов, Б.М. Кумицкий // Физика и химия обработки материалов, (1979), №2, с.65-69.
16. К. Ямафуджи, Ч. Бауэр // Актуальные вопросы теории дислокаций, Москва: Мир, (1968), с.115-131.
17. Р.И. Гарбер, Т.Т. Могильникова // ДАН СССР, (1958), т.118, с.479.
18. Р.И. Гарбер, Т.Т. Могильникова // Кристаллография, (1969), т.14, №1, с.137-139.
19. Р.И. Гарбер, Т.Т. Могильникова // Взаимодействие между дислокациями и атомами примесей и свойства металла, Тула: из-во Тульского политехнического института, (1974), с.122-127.