

О. Б. Наймарк, О. В. Ладыгин

НЕРАВНОВЕСНЫЕ КИНЕТИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ КАК МЕХАНИЗМЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Локализация пластической деформации обнаружена давно. Однако считалось, что это явление характерно только для больших степеней формоизменения твердых тел. В настоящее время установлено, что любая неупругая деформация протекает неоднородно, при этом в процесс поочередно вовлекаются различные области деформируемого материала, в то время как в остальных частях пластическое течение выражено слабо [1—6]. Эффекты пластической неустойчивости имеют место как при простых (растяжение [7], сжатие [8], кручение [9]), так и при сложных (ковка, штамповка, прокатка и др. [10]) режимах нагружения. Анализ экспериментальных результатов [11, 12] приводит к выводу, что способность поликристаллических материалов к пластическому течению есть способность к локализации деформации. Таким образом, актуальной становится проблема создания физически обоснованного описания деформирования твердых тел с учетом локализации пластической деформации.

В настоящей работе рассматривается поведение образцов из пластичных поликристаллических материалов в условиях одноосного растяжения. По данным [13], локализация деформации в этом случае развивается в два этапа. Сначала в виде «бегающей» шейки, т. е. мгновенного возникновения и стабилизации локальных утонений на образце. В дальнейшем при достижении деформации по сужению порядка 0,15—0,25 появляется устойчивая шейка, непрерывно уменьшающая свой деформирующийся объем вплоть до разрушения.

Многочисленные исследования локализации пластической деформации свидетельствуют, что последняя может сопровождаться значительным тепловым эффектом и развитием структурных и фазовых превращений, определяющих комплекс физико-механических свойств материала [14, 15]. В экспериментах это проявляется в уменьшении сопротивления деформированию, изменении коэффициентов упрочнения, аномальном характере диаграмм деформирования [16].

Микроструктурный анализ областей сосредоточенной деформации показывает, что локализация пластического течения последовательно происходит на разных уровнях [17]. На микроуровне — как возникновение внутри- и межзеренных неоднородностей [18], на мезоуровне — как следствие перехода от линий скольжения к полосам скольжения или от микрополос к полосам сдвига [19—21], на макроуровне — как эффект Портвена — Ле Шателле [22] и полосы Чернова — Людерса [23], шейкообразование и разрушение. Следовательно, невозможно дать адекватное описание локализации пластического течения посредством таких переменных, как напряжение, деформация, скорость деформации. Кроме них, необходимо знать количество, распределение и скорости перемещения существующих неоднородностей — дефектов.

Движение дефектов происходит под действием локальных напряжений, которые могут намного превышать макроскопические напряжения, приложенные к образцу. Неоднородность напряженного состояния вызывает возникновение различных мод деформации, обусловленных дефектами: трансляционной, сдвиговой, ротационной [24]. Теоретическое и экспериментальное изучение этого эффекта привело к формулировке концепции структурных уровней деформации твердых тел [25]. Согласно этой концепции, пластическая деформация должна протекать на не-

скольких структурных уровнях, каждый из которых характеризуется масштабом, определяемым природой структурных дефектов, ответственных за формоизменение. При этом первичным является трансляционное движение, которое всегда порождает аккомодационный поворот на другом структурном уровне. Затрудненность относительного движения структурных элементов приводит к их взаимодействию как целого, возникновению концентраторов напряжений на стыке нескольких элементов и как следствие этого нарушению сплошности материала.

Известно, что физическая природа повреждений может быть совершенно различной. Однако в настоящее время признание в качестве типичного дефекта структуры твердых тел получили микротрещины. Эти дефекты представляют собой характерный тип несовместности в сплошной среде. Зарождение и развитие несплошностей сопровождается процессами ползучести, пластического течения [26, 27], с микротрещинами связаны условия образования макроскопических трещин [28, 29].

Эксперименты показывают, что микротрещины в деформируемых металлах и сплавах всегда наблюдаются в местах локализации деформации: границах блоков, следах скольжения, на участках с повышенной плотностью дислокаций. В [30, 31] изучено распределение дефекта плотности по длине разорванных образцов и установлено, что в области шейки величина $\Delta\rho/\rho$ на 30 % больше средней. При этом иногда встречаются не одна, а несколько зон с повышенным разуплотнением [32].

Данные по кинетике накопления микроповреждений в шейке растягиваемого образца, приведенные в [33—38], показывают, что после начала локализации пластической деформации в центральной части осевого сечения развиваются микротрещины и поры. Плотность последних с увеличением степени деформации возрастает. По мере дальнейшего деформирования происходит слияние микротрещин и пор в центральную вязкую отрывную макротрещину, распространение которой приводит к разделению образца на части (макроразрушению). Таким образом, возникновение, рост и коалесценция пор, микротрещин являются основными эффектами при шейкообразовании и необходимо включить их в описание процессов локализации.

В [39, 40] с целью учета изменений структуры материала вводится симметричный тензор второго ранга $p_{ik} = n\langle s_{ik} \rangle$, определяющий объемную концентрацию и преимущественную ориентацию микротрещин. Макроскопический параметр p_{ik} получается в результате усреднения по статистическому ансамблю микротрещин, каждая из которых характеризуется микроскопическим тензором $s_{ik} = sv_k$ (s — объем микротрещины, \mathbf{v} — вектор ее ориентации). В [39, 40] методами неравновесной термодинамики построены уравнения состояния твердых тел с дефектами, включающие соотношение релаксационного типа для тензора напряжений σ_{ik} и кинетические уравнения для тензора плотности микротрещин p_{ik} :

$$(1) \quad \sigma_{il} = \xi e_{il}^p - \alpha_2 p_{il};$$

$$(2) \quad \Pi_{il} = \alpha_2 e_{il}^p - \alpha_1 p_{il};$$

$$(3) \quad \sigma'_{ik} = L_{iklm}^{(1)}(p_{\alpha\beta}) e'_{lm} - L_{iklm}^{(2)}(p_{\alpha\beta}) \frac{\Delta p'_{lm}}{\Delta t};$$

$$(4) \quad \Pi'_{ik} = L_{iklm}^{(2)}(p_{\alpha\beta}) e'_{lm} - L_{iklm}^{(3)}(p_{\alpha\beta}) \frac{\Delta p'_{lm}}{\Delta t}.$$

Здесь σ'_{ik} , e'_{lm} , p'_{ik} и σ_{il} , e_{il}^p , p_{il} — соответственно бесследовые и изотропные компоненты тензоров напряжений, скоростей пластических деформаций и тензора плотности микротрещин; $\Delta(\dots)/\Delta t$ — тензорная производная по времени (производная по Яуманну); $\Pi_{il} = \partial F / \partial p_{il}$ и $\Pi'_{ik} = \partial F / \partial p'_{ik}$ — изотропная и бесследовая компоненты термодинамической силы Π_{ik} , действующей на систему, когда значение p_{ik} отличается от равновесного; F — свободная энергия среды с микротрещинами. Урав-

нения (1) — (4) являются квазилинейными, т. е. кинетические коэффициенты ξ , α_1 , α_2 и $L_{iklm}^{(\alpha)}$ в общем случае зависят от инвариантов p_{ik} . С учетом симметрии тензора плотности микротрещин вид зависимости кинетических коэффициентов $L_{iklm}^{(\alpha)}$ от p_{ik} следующий [40]:

$$(5) \quad L_{iklm}^{(\alpha)} = l^{(\alpha)} \delta_{il} \delta_{km} + l_1^{(\alpha)} (p_{il} \delta_{km} + p_{kl} \delta_{im}) + l_2^{(\alpha)} p_{ik} p_{lm}$$

($l^{(\alpha)}$, $l_1^{(\alpha)}$ и $l_2^{(\alpha)}$ — феноменологические коэффициенты).

Отметим, что попытка охарактеризовать всю поврежденность в материале параметром p_{ik} представляет собой существенное предположение. Вообще говоря, совокупность дефектов следует описывать многими статистическими характеристиками и прежде всего пространственными спектрами [41]. В этом случае изучение эволюции дефектов приводит к системе кинетических уравнений для этих статистических характеристик. Переход от одного вида дефектов к другому должен происходить с нарушением устойчивости развития дефектов и сопровождаться резким увеличением их размеров. Описание процессов деформирования с использованием тензора плотности микротрещин предполагает, что характерные времена его изменения превышают времена развития дефектов более тонкой структуры.

Рассмотрим на основе уравнений (1) — (4) эффекты локализации пластического течения при растяжении цилиндрического образца в условиях одноосной ползучести ($\sigma = \sigma_{xx} = \text{const}$). Будем исходить из одномерной схемы процесса; кинетические коэффициенты полагаем постоянными; необратимые деформации подчиняются условию $Sp e_{ik}^p = 0$, а среднее напряжение определяется только упругой составляющей деформации ($\sigma_u = k U_u$). Тогда система уравнений состояния совместно с законом сохранения массы [42, 43] имеет вид

$$(6) \quad e_{xx} = \frac{2}{3l_1} \sigma_{xx} + \frac{2l_2}{3l_1} \dot{p}_{xx};$$

$$(7) \quad \dot{p}_{xx} = \frac{2l_2}{l_1(2l_3 + \alpha_1) - 2l_2^2} \sigma_{xx} - \frac{3l_1}{l_1(2l_3 + \alpha_1) - 2l_2^2} \Pi_{xxx};$$

$$(8) \quad \frac{\partial(S\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(Sv_x \rho)}{\partial x} = 0,$$

где $e_{xx} = e_{xx}^e + e_{xx}^p$ — полная скорость деформации (e_{xx}^e — скорость упругой деформации); $v_x = v_x(x, t)$ — скорость в сечении с координатой x в момент времени t ; $S = S(x, t)$ — соответствующая площадь поперечного сечения образца; $\rho = \rho(x, t)$ — плотность материала. Поскольку при одноосном растяжении разуплотнение $\Delta\rho/\rho$ по физическому смыслу есть объемная плотность микротрещин, то изменение ρ однозначно связано с параметром $p_{ik}(x, t)$ соотношением

$$(9) \quad \rho(x, t) = \rho_0(1 - Sp p_{ik})$$

(ρ_0 — плотность в начальный момент времени).

Как показывают результаты экспериментов по измерению дефекта плотности деформированных образцов, полученные дифференциальным методом гидростатического взвешивания [44], максимальная величина $\Delta\rho/\rho$ не превышает 10^{-3} и уравнение неразрывности можно записать в виде

$$(10) \quad \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(Sv_x)}{\partial x} = 0.$$

Следствием развитого в [39] статистического описания поведения ансамбля взаимодействующих микротрещин явился вывод о том, что спектр возможных реакций твердых тел на приложение нагрузки (абсолютно неустойчивая, метастабильная, равновесная — кривые 1—3 на рис. 1) может быть представлен разложением Ландау [45] для свобод-

ной энергии [40, 46]

$$(11) \quad F = \frac{1}{2} A p_{xx}^2 - \frac{1}{3} B p_{xx}^3 + \frac{1}{4} C p_{xx}^4 - D \sigma_{xx} p_{xx}$$

(A, B, C, D — феноменологические параметры материала).

В [27, 30] установлено, что зарождающиеся микротрещины крайне неравномерно распределены по деформируемому образцу: в приповерхностных слоях их концентрация на 1—3 порядка выше объемной. С целью учета пространственно неоднородной по p_{ik} ситуации включим в выражение для свободной энергии член, описывающий возможную неоднородность распределения тензора плотности микротрещин p_{ik} ;

$$(12) \quad F = \frac{1}{2} A p_{xx}^2 - \frac{1}{3} B p_{xx}^3 + \frac{1}{4} C p_{xx}^4 - D \sigma_{xx} p_{xx} - \frac{1}{2} D_1 \left(\frac{\partial p_{xx}}{\partial x} \right)^2$$

(D_1 — параметр, зависящий от состояния структуры материала). Уравнение движения p_{xx} получим, заменив в (7) частную производную $\partial F / \partial p_{xx}$ вариационной $\delta / \delta p_{xx} = \partial / \partial p_{xx} - \partial / \partial x \partial / \partial (\partial p_{xx} / \partial x)$:

$$(13) \quad \dot{p}_{xx} = \frac{2l_2}{l_1(2l_3 + \alpha_1) - 2l_2^2} \sigma_{xx} - \frac{3l_1}{l_1(2l_3 + \alpha_1) - 2l_2^2} \left(\Pi_{xx} - D_1 \frac{\partial^2 p_{xx}}{\partial x^2} \right).$$

После перехода к безразмерным переменным $\Sigma = \sigma_{xx} / \sigma_s$, $\Gamma = e_{xx} t_m$, $\tau = t / t_m$, $\Pi = \Pi_{xx} / \sigma_s$, $a = d / d_0$, $\xi = l / d_0$, $p = p_{xx}$, $t_m = l_1 / G$ имеем

$$(14) \quad \Pi = A_1 p - B_1 p^2 + C_1 p^3 - D \Sigma;$$

$$(15) \quad \Gamma = A_2 \Sigma + A_3 \frac{dp}{d\tau};$$

$$(16) \quad \frac{dp}{d\tau} = A_4 \Sigma - A_5 \Pi + A_6 \frac{d^2 p}{d\xi^2};$$

$$(17) \quad \frac{da}{d\tau} = -\frac{1}{2} a \Gamma,$$

где $A_1 = A / \sigma_s$; $B_1 = B / \sigma_s$; $C_1 = C / \sigma_s$; $A_2 = 2\sigma_s / 3G$; $A_3 = 2l_2 / 3l_1$;

$$A_4 = \frac{\sigma_s}{G} \frac{2l_2}{2l_3 + \alpha_1 - 2l_2^2 / l_1}; \quad A_5 = \frac{\sigma_s}{G} \frac{3l_1}{2l_3 + \alpha_1 - 2l_2^2 / l_1};$$

$$A_6 = \frac{D_1}{d_0^2} \frac{3l_1 t_m}{l_1(2l_3 + \alpha_1) - 2l_2^2}; \quad d_0 \text{ и } l_3 - \text{ диаметр и длина рабочей части}$$

образца в начальный момент времени; $d = d(x, t)$ — диаметр в сечении с координатой x в момент времени t ; G и σ_s — модуль Юнга и предел текучести материала образца.

Численное исследование системы (14) — (17) проводилось с использованием метода конечных разностей. В качестве материала образца был выбран алюминий, который образует хорошо развитую шейку и деформируется в условиях сильного увеличения (на два — три порядка) истинных скоростей течения [47]. Оценка констант, входящих в уравнения (14) — (16), осуществлялась методом наименьших квадратов [48]. В ос-

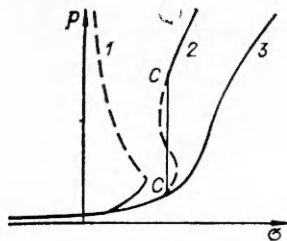


Рис. 1

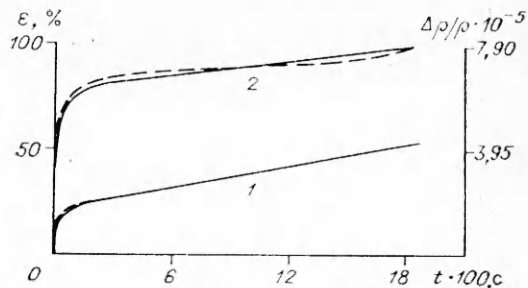


Рис. 2

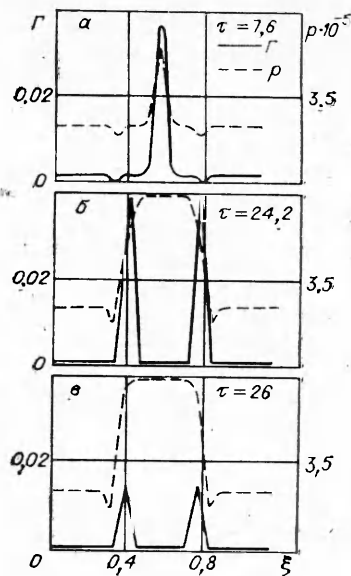
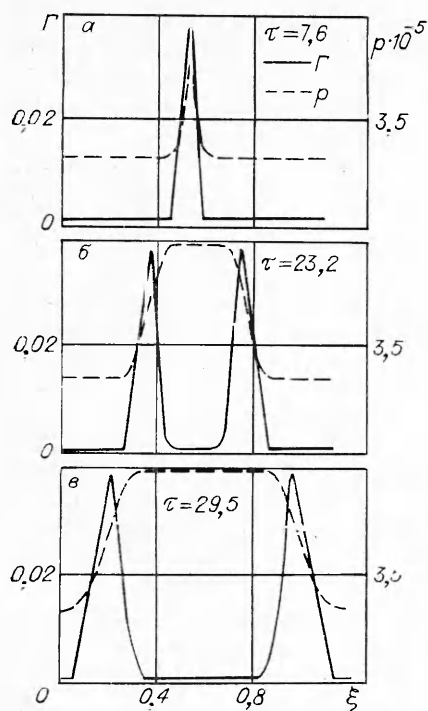


Рис. 4

Рис. 3

нове последней лежала аппроксимация кривых ползучести (сплошная линия 1 на рис. 2) и дефекта плотности $\Delta\rho/\rho$ (сплошная линия 2), полученных в случае испытания на долговечность образца из алюминия при $T = 18^\circ\text{C}$, $\sigma = 70$ МПа [31]. На рис. 2 приведены результаты численного решения системы (6), (7) (штриховые линии) для следующих значений искомых параметров: $l_1 = 3,092 \cdot 10^{11}$ Н·с/м², $l_2 = 1,519 \cdot 10^{15}$ Н·с/м², $2l_3 + \alpha_1 = 8,027 \cdot 10^{10}$ Н·с/м², $A = 7,23 \cdot 10^{18}$ Па, $B = 9,438 \cdot 10^{22}$ Па, $C = 4,069 \cdot 10^{26}$ Па, $D = 2,616 \cdot 10^6$. Отметим, что расчетный коэффициент l_1 , который является аналогом сдвиговой вязкости материала, практически совпадает с экспериментальными данными, представленными в [49]. Величины остальных констант для алюминиевого образца таковы: $\sigma_s = 35$ МПа, $G = 70$ ГПа [50].

Параметры A , B , C , D , определенные при обработке результатов эксперимента, описывают устойчивую реакцию материала на зарождение и рост микротрещин, что соответствует материалу с относительно малым размером зерна. С целью учета неоднородности свойств, которая характерна для реальных металлов и сплавов, был задан статистический спектр реакций твердого тела на трещинообразование. Комплексы констант для различных зависимостей $p(\Sigma)$ получены варьированием B при неизменных A , C и D .

Начальные и граничные условия для уравнений (14)–(17) имеют вид

$$(18) \quad \Sigma = 1,44, \quad p(\xi, 0) = p_3, \quad d(\xi, 0) = 1, \quad \xi_0 = 5, \\ \Gamma(\xi, 0) = 0, \quad \nabla p(0, \tau) = 0, \quad \nabla p(l, \tau) = 0.$$

Результаты численного решения системы (14)–(18) для образцов с различной исходной структурой представлены на рис. 3, 4. В области метастабильных реакций материала на зарождение и рост микротрещин формируется волна пластических деформаций (рис. 3). В момент времени $\tau = 7,6$ однородность деформации внезапно нарушается и на образце появляется локальное утонение — шейка. Последняя сужается до некоторого значения, после чего начинает распространяться вдоль образца, пока не охватывает его целиком. Профиль пластической волны, определяющий форму границы шейки, распространяется с постоянной ско-

ростью. В зависимости от исходного состояния материала при наличии спектра метастабильных реакций вдоль образца возможно возникновение нескольких очагов локализации пластического течения. Множественные шейки неоднократно наблюдались экспериментально при растяжении в условиях ползучести [51] и при активном деформировании [16, 22, 23].

Причина подобного поведения образцов на макроскопическом уровне — существенно нелинейная кинетика развития ансамблей микротрещин. Исходный статистический разброс свойств материала приводит к множественным кинетическим переходам по переменной p_{ik} . Следствие кинетического перехода — формирование более упорядоченной системы несплошностей, обеспечивающей минимальное пластическое сопротивление по некоторым выделенным направлениям скольжения. При этом происходят резкое уменьшение времен релаксации напряжений, повышение скорости деформации (рис. 3, а) и как следствие локализация пластического течения. Такое локальное увеличение пластичности не приводит к разрушению образца из-за конечной величины скачка по параметру p_{ik} . С момента времени $\tau = 23,2$ в области шейки устанавливается режим деформирования с постоянным уровнем объемной концентрации микротрещин, значение Γ при этом существенно падает.

Причиной, ответственной за распространение шейки, является неоднородность распределения дефектов, формирующая пространственный фронт неравновесного структурного (ориентационного) перехода. В сечениях, охваченных структурным переходом, реализуется интенсивное пластическое течение, сопровождающееся локализацией. Наличие устойчивой реакции (так называемых термодинамических ветвей [40]) привносит определенную специфику в эволюцию ансамбля дефектов и особенности локализации деформации. Это связано с тем, что для мелкозернистых материалов процесс роста микротрещин характеризуется относительно слабым их объемным и ориентационным взаимодействием и уровень приложенного напряжения оказывается недостаточным для перехода на метастабильную ветвь. В этих условиях пластическая неустойчивость проявляется как возникновение и стабилизация локальных утонений в различных местах образца со скачкообразным изменением величины Γ и перестройкой структуры материала (см. рис. 4). Естественно интерпретировать такой режим течения как неустойчивую локализацию деформации.

Случай абсолютно неустойчивой реакции детально изучен в [52]. Кинетика накопления несплошностей в данной ситуации характеризуется взрывной неустойчивостью (режим с обострением [39]) и образованием очагов разрушения. Последнее происходит при коалесценции микротрещин в условиях резкого роста их концентрации. На макроскопическом уровне это приводит к неограниченному увеличению скорости деформации и разделению образца на части.

Таким образом, развитый подход позволяет моделировать неустойчивости процесса деформирования и локализацию пластического течения. Механизмом пластических неустойчивостей является ориентационный кинетический переход по параметру p_{ik} , сопровождающийся пространственно-временной самоорганизацией дефектов [53]. В этом случае деформируемый материал следует рассматривать как систему, в которой в ходе деформации возникают диссипативные структуры, способные более эффективно осуществлять макропластическое течение по сравнению с движением отдельных дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рассоха А. А. Солитонная локализация пластического деформирования // Экспериментально-расчетные методы автоматизированного проектирования. — Киев: УМК ВО, 1988.
2. Рассоха А. А., Полонский В. Ю. Спекл-голографическое исследование пластических деформаций // Голография: Теоретические и прикладные вопросы: Матер. 19-й Всесоюз. шк. по гологр. — Л., 1988.

3. Полонекій В. Ю. Голографічне дослідження неоднорідного пластичного деформування // Експериментально-радіометричні методи автоматизованого проектування.— Київ: УМК ВО, 1988.
4. Панин В. Е. Волновая природа пластической деформации твердых тел // Изв. вузов. Физика.— 1990.— № 2.
5. Фролов К. В., Панин В. Е., Зуев Л. Б. и др. Релаксационные волны при пластической деформации // Изв. вузов. Физика.— 1990.— № 2.
6. Панин В. Е., Зуев Л. Б., Данилов В. П., Мних Н. М. Пластическая деформация как волновой процесс // ДАН СССР.— 1989.— Т. 308, № 6.
7. Бэкоффен В. Процессы деформации.— М.: Металлургия, 1977.
8. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов.— М.: Металлургияиздат, 1960.— Т. 1—3.
9. Grabianowski A., Kurowski M. Plastic instability in a torsion test below the limit of uniform straining // Z. Metallk.— 1988.— V. 79, N 11.
10. Пресняков А. А. Очаг деформации при обработке металлов давлением.— Алма-Ата: Наука, 1988.
11. Пресняков А. А. Локализация пластической деформации.— Алма-Ата: Наука, 1981.
12. Пресняков А. А. Локализация пластической деформации.— М.: Машиностроение, 1983.
13. Пресняков А. А., Черноусова К. Т., Черноглазова Т. В., Мофа Н. Н. Развитие локализации деформации при растяжении хрупких и пластических материалов // Материаловедение конструкционных материалов сельскохозяйственных машин.— Алма-Ата: КазСХИ, 1988.
14. Рубцов А. С., Рыбин В. В. Структурные особенности пластической деформации на стадии локализации течения // ФММ.— 1977.— Т. 44, № 3.
15. Дзуртов М. Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов.— М.: Металлургия, 1977.
16. Kubin L. P., Estrin Y. Strain nonuniformities and plastic instabilities // Rev. Phys. Appl.— 1988.— V. 23, N 4.
17. Neuhausen H. On some problem in plastic instabilities and strain localization // Rev. Phys. Appl.— 1988.— V. 23, N 4.
18. Брето Т., Мюссо П., Рей С. Микронеоднородности пластической деформации и макроскопические свойства однофазных и многофазных материалов // Тр. Америк. о-ва приж.-мех. Теорет. основы приж. расчетов.— 1984.— Т. 106, № 4.
19. Pecherski R. V. Physical nature of shear bands formation and constitutive modeling for plastic instability // Rev. Phys. Appl.— 1988.— V. 23, N 4.
20. Dubois Ph., Rey C. Crystallographical analysis of shear bands initiation and propagation in pure metals // Rev. Phys. Appl.— 1988.— V. 23, N 4.
21. Bochniak W. The microstructure of Luders band in Cu—Sn₂ alloy // Scripta Metallurgica.— 1989.— V. 23, N 4.
22. Белл Ф. Дж. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел: В 2-х ч.— М.: Наука, 1984.
23. Физическое материаловедение: В 3-х т./Под ред. Р. У. Капа, П. Хаазена.— Т. 3: Физико-механические свойства металлов и сплавов.— М.: Металлургия, 1987.
24. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел.— Новосибирск: Наука, 1985.
25. Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Елсукова Т. Ф., Иванчин А. Г. Структурные уровни деформации твердых тел // Изв. вузов. Физика.— 1982.— Т. 25, № 6.
26. Бетехтин В. И. Долговечность и структура кристаллических тел // Проблемы прочности и пластичности твердых тел.— Л.: Наука, 1979.
27. Бетехтин В. П., Владимиров В. П., Кадомцев А. Г., Петров А. И. Пластическая деформация и разрушение кристаллических тел // Пробл. прочност.— 1979.— № 7—9.
28. Бетехтин В. П., Владимиров В. П. Кинетика микроразрушения кристаллических тел // Проблемы прочности и пластичности твердых тел.— Л.: Наука, 1979.
29. Инденбом В. Л., Орлов А. П. Долговечность материалов под нагрузкой и накопление поврежденный // ФММ.— 1977.— Т. 43, № 3.
30. Бетехтин В. П., Петров А. П., Савельев В. Н. Распределение дефекта плотности по объему деформированного алюминия // ФТТ.— 1973.— Т. 15, № 2.
31. Бетехтин В. П., Петров А. П., Савельев В. Н. Кинетика накопления микроскопических разрывов сплошности в процессе испытания алюминия на долговечность и ползучесть // ФММ.— 1974.— Т. 38, № 4.
32. Бетехтин В. П., Шмидт Ф. Микроразрушение кристаллических материалов, находящихся в пластичном состоянии // Проблемы ФТТ и материаловедения.— М.: Наука, 1976.
33. Лебедев А. А., Марусий О. И., Чаусов Н. Г., Зайцева Л. В. Исследование кинетики разрушения пластичных материалов на заключительной стадии деформирования // Пробл. прочност.— 1982.— № 1.
34. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Марусий О. И. и др. Исследование кинетики разрушения листового пластичного материала на заключительной стадии деформирования // Пробл. прочност.— 1988.— № 12.
35. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Марусий О. И. и др. Кинетика разрушения листовой аустенитной стали на заключительной стадии деформирования // Пробл. прочност.— 1989.— № 3.

36. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Евецкий Ю. Л. Определение параметров поврежденности пластичных материалов на стадии разупрочнения // Пробл. прочност. — 1989. — № 9.
37. Perzyna P., Nowak Z. Evolution equation for void fraction parameter in necking region // Arch. Mech. — 1987. — V. 39, N 1—2.
38. Пежина П. Моделирование закритического поведения и разрушения диссипативного твердого тела // Тр. Америк. о-ва приж.-мех. Теорет. основы приж. расчетов. — 1984. — Т. 106, № 4.
39. Наймарк О. Б. О термодинамике деформирования и разрушения твердых тел с микротрещинами. — Свердловск, 1982. — (Препр./АН СССР, Урал. отд-ние, Ин-т механики сплошных сред; № 22).
40. Наймарк О. Б. О порообразовании, уравнениях состояния и устойчивости сверхпластического деформирования материалов // ПМТФ. — 1985. — № 4.
41. Баренблатт Г. И., Ботвина Л. Р. Методы подобия в механике и физике разрушения // Физико-химическая механика материалов. — 1986. — № 1.
42. Баренблатт Г. И. О распространении шейки при растяжении полимерных образцов // ПММ. — 1964. — Т. 28, № 6.
43. Баренблатт Г. И. Изотермическое распространение шейки в полимерах // Изв. АН СССР. МТТ. — 1972. — № 6.
44. Гришаев С. Н., Наймарк О. Б. Исследование пластического разрыхления и кинетики разрушения металлов // Структурно-механическое исследование материалов и конструкций. — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984.
45. Ландау Л. Д., Халатников И. М. Об аномальном поглощении звука вблизи точек фазового перехода второго рода // ДАН СССР. — 1954. — Т. 96, № 3.
46. Наймарк О. Б., Давыдова М. М., Постных А. М. О деформировании и разрушении гетерогенных материалов с микротрещинами // Механика композит. материалов. — 1984. — № 2.
47. Пресняков А. А., Мофа Н. Н. Локализация деформации алюминия и некоторых его сплавов при растяжении // Изв. АН СССР. Металлы. — 1981. — № 2.
48. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976.
49. Годунов С. К., Демчук А. Ф., Козин Н. С., Мали В. И. Интерполяционные формулы зависимости максвелловской вязкости некоторых металлов от интенсивности касательных напряжений и температур // ПМТФ. — 1974. — № 4.
50. Алюминий: свойства и физическое металловедение/Под ред. Дж. Е. Хэтча. — М.: Металлургия, 1989.
51. Курлаев А. Р., Сидорин Ю. В. Скачки деформации при ползучести // ДАН СССР. — 1990. — Т. 311, № 3.
52. Naimark O. B., Silberschmidt V. V., Ladygin O. V. Anomalies of plasticity: non-linear effects and conditions of stable deformation // Int. Conf. Non-Linear Phen. Phys. Mech. Solids. Abstr., 1990.
53. Хаген Г. Спирететика. — М.: Мир, 1980.

г. Пермь

Поступила 25/XI 1991 г.,
в окончательном варианте —
20/IV 1992 г.

УДК 539.4.015 : 539.37

Д. Н. Карпинский, С. В. Санников

РАСЧЕТ ЭВОЛЮЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ И СВЯЗАННЫЕ С НЕЙ ЯВЛЕНИЯ

Представлены результаты вычислений на ЭВМ эволюции пластической деформации у вершины трещины в кристалле. Пластическая деформация у вершины трещины обусловлена термоактивированным движением дислокаций в плоскостях активного скольжения кристалла при совместном действии внешнего растягивающего напряжения и тепловых флуктуаций. Получены распределения пластической деформации и напряжения у вершины трещины в различные моменты времени. Вычислено влияние пластической зоны на коэффициент интенсивности напряжения (КИН) трещины.

1. Введение. В последние годы в исследованиях по механике разрушения все чаще обращаются к микроскопическим моделям процессов, протекающих в окрестности трещины. Для их описания предложены но-

© Д. Н. Карпинский, С. В. Санников, 1993