

01:05

©1993 г.

## ВЛИЯНИЕ ПОДВИЖНОСТИ И АННИГИЛЯЦИИ ДИСЛОКАЦИЙ ЛЕСА НА СКОРОСТЬ ПОЛЗУЧЕСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, УПРОЧНЕННЫХ ЧАСТИЦАМИ ВТОРОЙ ФАЗЫ

*Д.Ш.Ибрагимова, Ю.С.Пятилетов, О.Г.Тюпкина*

В рамках модели ползучести, основанной на скольжении и переползании дислокаций, с использованием моделирования движения дислокаций через сетку случайных препятствий рассчитана зависимость скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  металлических материалов, содержащих частицы второй фазы, от напряжения  $\tau$ . Установлено, что учет подвижности и аннигиляции дислокаций леса приводит к увеличению расчетного значения  $\dot{\epsilon}$ , причем эффект возрастает с повышением  $\tau$ , достигая 10–15% при  $\tau = 0.8\tau_{кр}$  ( $\tau_{кр}$  — критическое напряжение сдвига).

### Введение

В последнее время все более широкое применение на практике находят сплавы, упрочненные частицами второй фазы, ибо они сохраняют высокую прочность и пластичность при эксплуатации в экстремальных условиях, в том числе при высоких температурах вплоть до  $0.7 - 0.8T_{пл}$  ( $T_{пл}$  — температура плавления). Хорошо установленным фактом является связь прочностных и пластических свойств этих сплавов с такими характеристиками частиц второй фазы, как средний размер и объемная плотность, определяющими эффективность частиц как стопоров для элементарных носителей пластической деформации — дислокаций [1]. Наряду с частицами второй фазы в качестве стопоров служат также всегда присутствующие в материале дислокации леса. В процессе ползучести последние имеют возможность двигаться посредством переползания, поглощая или испуская вакансии, а также аннигилировать при сближении двух дислокаций противоположного знака на расстояние, равное радиусу аннигиляции  $R_a$ . Ясно, что характер продвижения скользких дислокаций через набор препятствий, часть из которых движется и аннигилирует, изменяется по сравнению со случаем неподвижных барьеров, что должно повлечь за собой изменение скорости деформации. Целью настоящей работы является оценка влияния процессов движения и аннигиляции дислокаций леса на скорость ползучести сплавов, содержащих частицы второй фазы.

В качестве объекта исследования выбран модельный металлический материал с кубической решеткой, содержащий хаотически распределенные по объему частицы второй фазы со средним радиусом  $r_p$  и плотностью  $N_p$ , а также прямолинейные краевые дислокации, ориентированные вдоль координатных осей  $x_\beta$  ( $\beta = 1, 2, 3$ ), совпадающих с кристаллографическими направлениями  $[100], [010], [001]$ , и имеющие векторы Бюргера вдоль  $x_\beta$ , причем плотности дислокаций разной ориентации равны друг другу ( $\rho_n^{(1)} = \rho_n^{(2)} = \rho_n^{(3)}$ ). Скорость установившейся ползучести вычисляем в рамках модели, учитывающей скольжение и переползание дислокаций [2]. Согласно этой модели, краевые дислокации под действием сдвиговых компонент напряжения движутся в плоскостях скольжения до тех пор, пока не остановятся на барьерах. При этом они силовым путем преодолевают некоторое число барьеров и покрывают расстояние  $L$ , которое зависит от расположения барьеров, их мощности и от величины действующего на дислокацию сдвигового напряжения  $\tau$ . Затем дислокации преодолевают эти барьеры либо переползанием, поглощая термические вакансии, либо термоактивационно, выходят в новую плоскость скольжения и снова скользят на расстояние  $\sim L$ . Далее процесс многократно повторяется, в результате чего образец деформируется с некоторой скоростью  $\dot{\epsilon}$ , выражение для которой зависит от соотношения между временами преодоления барьеров дислокаций за счет переползания  $t_n$  и термических активаций  $t_\tau$ . В случае  $t_n \ll t_\tau$ , когда преобладающим является переползание, выражение для  $\dot{\epsilon}$  принимает вид

$$\dot{\epsilon} = \frac{L}{r_p} \xi \rho_n^{(1)} Z_v^{(1)} D_v C_v^e \frac{\sigma_{11} \Omega}{kT}. \quad (1)$$

Если же выполняется обратное неравенство  $t_\tau \ll t_n$  и дислокации преодолевают препятствия термоактивационно, то скорость ползучести рассчитывается по формуле

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2} b \rho_n^{(1)} \xi \nu L \exp \left[ -\frac{U(\tau)}{kT} \right]. \quad (2)$$

В приведенных формулах  $\xi$  означает численный коэффициент порядка единицы;  $\Omega$  — атомный объем матрицы;  $\sigma_{11}$  — растягивающая компонента тензора напряжения;  $b$  — модуль вектора Бюргера;  $\nu$  — частота колебаний дислокационного сегмента, закрепленного своими концами на препятствиях;  $U(\tau)$  — энергия активации преодоления дислокацией этих препятствий;  $D_v$  — коэффициент диффузии вакансий;  $C_v^e$  — их равновесная концентрация вдали от дислокаций;  $Z_v^{(1)}$  — параметр, характеризующий эффективность поглощения дислокацией вакансий. Выражения для  $D_v$ ,  $C_v^e$ ,  $Z_v^{(1)}$  имеют вид

$$D_v = D_{v0} \exp \left( -\frac{E_v^m}{kT} \right), \quad (3)$$

$$C_v^e = \exp \left( -\frac{E_v^f}{kT} \right), \quad (4)$$

$$Z_v^{(1)} = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{2R}{L^{(1)}}\right)}, \quad (5)$$

где  $D_{v0}$  — константа;  $E_v^m$  и  $E_v^f$  — энергии миграции и образования вакансий соответственно;  $R$  — среднее расстояние между дислокациями;

$$L^{(1)} \approx \frac{\mu b(1+\nu)|\Delta\Omega_v|}{3(1-\nu)\pi kT}$$

— расстояние от ядра дислокации, на котором энергия взаимодействия с вакансией равна  $kT$ ;  $\Delta\Omega_v$  — релаксационный объем, связанный с вакансией.

Как видно из (1) и (2), вклад скольжения дислокаций в  $\dot{\epsilon}$  определяется параметром  $L$  — средним расстоянием, проходимым дислокацией в плоскости скольжения между двумя устойчивыми конфигурациями под действием напряжения  $\tau$ . Поэтому одна из важных задач при определении скорости ползучести  $\dot{\epsilon}$  — рассчитать  $L$  при разных значениях  $\tau$ .

### Моделирующие расчеты параметра $L$

Точный расчет  $L$  даже в случае жестко закрепленных неподвижных препятствий сопряжен с большими вычислительными трудностями, ибо необходимо анализировать движение дислокации как целого в плоскости скольжения, в которой хаотически распределены барьеры заданной мощности. Однако, как следует из работ [3–5], для этой цели можно использовать моделирование на ЭВМ. Здесь мы модифицируем разработанную в [4,5] модель скольжения дислокации через локальные препятствия путем отказа от одного из основных положений, принятых в [3–5], — жесткого закрепления барьеров, с тем чтобы учесть влияние на  $L$  и  $\dot{\epsilon}$  подвижности и аннигиляции дислокаций леса.

Алгоритм расчета  $L$  выглядит следующим образом. Считаем, что первоначально на прямоугольной площадке моделирования, имитирующей плоскость скольжения, хаотически расположены точечные препятствия двух типов, отвечающих частицам второй фазы и дислокациям леса, а исследуемая скользящая дислокация в виде гибкой нити постоянного натяжения лежит в начале площадки. Продвижение этой дислокации под действием сдвигового напряжения осуществляется как последовательность элементарных актов открепления от точечных барьеров, препятствующих ее скольжению. Сила, с которой она действует на  $i$ -е препятствие, определяется углом  $\varphi_i$  между соседними дислокационными сегментами на  $i$ -м препятствии

$$F_i = 2\Gamma \cos\left(\frac{\varphi_i}{2}\right), \quad (6)$$

где  $\Gamma$  — линейное натяжение дислокации.

Из (6) следует, что мощность  $i$ -го препятствия можно характеризовать значением критического угла  $\varphi_i^{кр}$ , при котором сила будет достаточной для преодоления дислокацией данного препятствия. Зависшая на препятствиях дислокация прогибается между ними, образуя круговые сегменты радиусом

$$R = \frac{\beta\mu b}{2\tau}, \quad (7)$$

где  $\beta$  — коэффициент порядка единицы.

Если напряжение  $\tau$  меньше, чем критическое напряжение сдвига  $\tau_{кр}$ , то дислокация проходит некоторое расстояние  $L(\tau)$ , преодолевая часть препятствий, и останавливается в устойчивой конфигурации, такой что на всех препятствиях углы  $\varphi_i$  оказываются больше  $\varphi_i^{кр}$ . Под  $\tau_{кр}$  понимается минимальное напряжение, при котором вся площадка моделирования проходит дислокацией без образования устойчивой конфигурации.

Дислокация пребывает в устойчивой конфигурации в течение времени

$$t = \frac{t_n t_\tau}{t_n + t_\tau},$$

после чего она освобождается от препятствий, преодолев их переползанием или термоактивационно. Поскольку все дислокации леса переползают с одинаковой средней скоростью —  $V_\perp$ , то за время  $t$  они изменяют свое положение вдоль одной из координатных осей  $X_1, X_2$  (в зависимости от ориентации вектора Бюргерса) на величину  $\pm \Lambda (\Lambda = V_\perp t)$ . Указанные направления переползания считаются равноправными и разыгрываются с помощью датчика случайных чисел. Возможность аннигиляции дислокаций леса, имеющих противоположные векторы Бюргерса, учитывается введением радиуса аннигиляции  $R_a$ . Считается, что две дислокации леса, оказавшиеся на расстоянии  $\leq R_a$  друг от друга, аннигилируют с вероятностью 1/4, равной вероятности встречи дислокаций с противоположно ориентированными векторами Бюргерса. Барьеры, отвечающие таким дислокациям, удаляются из массива препятствий, но поскольку ЭВМ эксперимент проводится для постоянной плотности препятствий, то этот массив дополняется таким же количеством аналогичных барьеров, координаты которых разыгрываются с помощью датчика случайных чисел.

В соответствии со сказанным проведена модификация схемы вычисления  $L$ , направленная на учет подвижности и аннигиляции дислокаций леса. Она заключается в том, что после каждой остановки дислокации в устойчивой конфигурации у барьеров, отвечающих дислокациям леса, изменяется одна из координат ( $X_1$  или  $X_2$ ) на величину  $\pm \Lambda$ . После вытеснения и удаления проаннигилировавших барьеров и введения вместо них такого же числа эквивалентных им барьеров исследуется возможность силового преодоления препятствий дислокацией и вычисляется дополнительное расстояние  $\Delta L$ , проходимое дислокацией благодаря тому, что часть барьеров изменила свое местоположение.

Из цитированных выше работ [3-5] известно, что значение  $L$  зависит от внешнего напряжения  $\tau$  и таких характеристик барьеров, как мощность, задаваемая критическим углом срыва  $\varphi^{кр}$ , и плотность (или среднее расстояние между барьерами  $l$ ). При изучении двухфазных сплавов имеет значение также соотношение между плотностями «слабых»  $\rho_n^\beta$  и «сильных» барьеров  $2r_p N_p$ , отвечающих дислокациям леса и частицам второй фазы соответственно. Ясно, что от этих же величин зависит и  $\Delta L$ .

Поэтому представляет интерес выяснить, каким образом влияет на  $L$  и  $\Delta L$  каждая из названных величин. С этой целью введем безразмерные параметры  $\Lambda^* = \Lambda/l$ ;  $R_a^* = R_a/l$  и долю «сильных» барьеров

$$\kappa = \frac{2r_p N_p}{\rho_n^{(\beta)} + 2r_p N_p}.$$

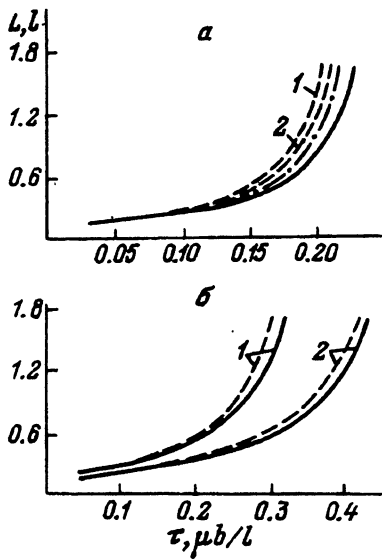


Рис. 1. Зависимость расстояния  $L$ , прошедшего дислокацией между двумя устойчивыми конфигурациями, от напряжения, найденная без учета (сплошные линии) и с учетом (штриховые и штрихпунктир) движения и аннигиляции дислокаций леса.

$a$  —  $\kappa = 0$ ;  $R_a^* = 0.025$  (1,2), 0.1 (штрихпунктир);  $\Lambda^* = 0.3$  (1), 0.1 (2), 0.25 (штрихпунктир);  
 $b$  —  $R_a^* = 0.25$ ;  $\Lambda^* = 0.2$ ;  $\kappa = 0.3$  (1), 0.7 (2).

Кроме того, в соответствии с классификацией Бемента [6] будем считать, что частицы второй фазы являются сильными барьерами и характеризуются критическим углом срыва  $\varphi_{кр}^{(1)} = 1.4$  рад, тогда как дислокация леса — это слабые барьеры ( $\varphi_{кр}^{(2)} = 2.2$  рад). Моделирующие расчеты  $L$  при разных значениях  $\tau$ ,  $\Lambda^*$ ,  $R_a^*$ ,  $\kappa$  проведем как с учетом, так и без учета подвижности и аннигиляции дислокаций. Наиболее информативные результаты в виде зависимости  $L$  (в единицах  $l$ ) от напряжения  $\tau$  (в единицах  $\mu b/l$ ) приведены на рис. 1. Из сравнения штриховых 1,2 и штрихпунктирной линии на рис. 1,а, отвечающих различным отличным от нуля значениям  $\Lambda^*$  и  $R_a^*$ , со сплошной линией, найденной в пренебрежении движением и аннигиляцией дислокаций леса, следует, что  $L$  увеличивается с возрастанием  $\Lambda^*$  и  $R_a^*$ . Причем движение дислокаций (эффект  $\Lambda^*$ ) отражается на величине  $\Delta L$  сильнее, чем аннигиляция (эффект  $R_a^*$ ), как это явствует из сравнения штриховой кривой 2 со штрихпунктирной.

На рис. 1,б приведены зависимости  $L(\tau)$ , рассчитанные при фиксированных  $\Lambda^*$ ,  $R_a^*$  и двух значениях  $\kappa$ , отвечающих разным соотношениям между количеством слабых и сильных барьеров, отвечающих дислокациям леса и частицам второй фазы соответственно. Из сравнительного анализа кривых на рис. 1,б можно заключить, что увеличение относительной доли частиц второй фазы (или увеличение  $\kappa$ ) приводит к уменьшению как  $L$ , так и  $\Delta L$ , т.е. к деградации эффекта от движения и аннигиляции дислокаций леса.

Представляет интерес рассмотреть последовательность устойчивых конфигураций скользящей дислокации, соответствующих разным значениям внешнего напряжения. На рис. 2 представлены три такие конфигурации, отвечающие положениям дислокации до и после протекания процессов движения и аннигиляции дислокаций леса. Как видно из рис. 2,а, при относительно низком напряжении ( $\tau = 0.3\tau_{кр}$ ) изменение устойчивой

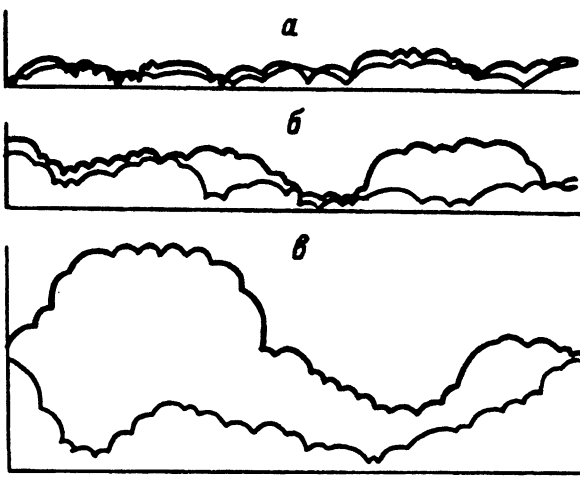
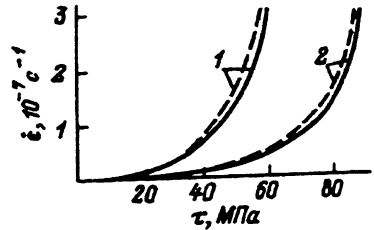


Рис. 2. Фрагменты устойчивых конфигураций дислокации при напряжениях 0.3 (а), 0.7 (б),  $0.85 \tau_{кр}$  (в), полученные с учетом (верхние линии) и без учета (нижние линии) движения и аннигиляции дислокаций леса.  
 $\kappa = 0$ ,  $R_a^* = 0.025$ ,  $\Lambda^* = 0.3$ .

Рис. 3. Зависимость скорости ползучести от напряжения, рассчитанная без учета (сплошные линии) и с учетом (штриховые) движения и аннигиляции дислокаций леса.  
 $\kappa = 0.3$  (1),  $0.7$  (2);  $R_a^* = 0.05$ ;  $\Lambda^* = 0.2$  (штриховые линии).



конфигурации дислокации в результате учета движения и аннигиляции дислокаций леса происходит путем единичных срывов дислокации с барьеров и приводит лишь к небольшому дополнительному продвижению  $\Delta L$  (соответствующая площадь заштрихована). Как показал анализ результатов ЭВМ эксперимента, при напряжениях выше  $\sim 0.55 \tau_{кр}$  продвижение дислокации происходит по механизму „расстегивания молнии“, когда открепление дислокации от одного из барьеров инициирует последовательное преодоление ею целого ряда соседних препятствий к продвижению на значительное расстояние  $\Delta L$  (рис. 2,б). Наконец, при напряжениях, близких к  $\tau_{кр}$ , происходит лавинообразное отстегивание дислокации от препятствий, в результате чего  $\Delta L$  резко увеличивается (рис. 2,в), а дислокация преодолевает всю площадку моделирования при напряжениях, меньших  $\tau_{кр}$ .

### Результаты расчета скорости ползучести

Используя результаты вычисления  $L(\tau)$ , представленные на рис. 1,б, выявим влияние подвижности и аннигиляции дислокаций леса на скорость ползучести сплавов, упрочненных частицами второй фазы. С этой

целью рассчитаем зависимость  $\dot{\epsilon}$  от  $\tau$  с учетом указанных процессов и сравним с соответствующими зависимостями  $\dot{\epsilon}(\tau)$  без их учета. Вычисления проведем по формуле (1) с использованием расчетных параметров для сплавов на основе железа  $b = 2.48 \cdot 10^{-10}$  м,  $\mu = 8 \cdot 10^4$  МПа,  $\nu = 1/3$ ,  $\Delta\Omega_v = -6 \cdot 10^{-30}$  м<sup>3</sup>,  $\Omega = 1.2 \cdot 10^{-29}$  м<sup>3</sup>,  $D_{v0} = 6 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с,  $E_v^f = 3.2 \times 10^{-19}$  Дж,  $E_v^m = 2.4 \cdot 10^{-19}$  Дж, кроме того, положим  $\xi = 1$ ,  $\sigma_{11} = \tau$ ,  $l = 10^{-7}$  м,  $r_p = 10^{-8}$  м,  $T = 0.6$ ,  $T_{пл} = 1080$  К. Результаты расчета  $\dot{\epsilon}(\tau)$  при фиксированных  $\Lambda^*$ ,  $R_a^*$  и двух значениях  $\kappa$  приведены на рис. 3. Из сравнения рис. 3 с соответствующими кривыми на рис. 1, 6 следует, что вид зависимости  $\dot{\epsilon}(\tau)$  при больших  $\tau$  определяется главным образом поведением функции  $L(\tau)$ , а в области относительно низких значений  $\tau$  более существен линейный по напряжению член в формуле (1). Что же касается влияния на подвижности и аннигиляции дислокаций леса, то оно полностью осуществляется через  $L(\tau)$ , поэтому соображения, высказанные при обсуждении рис. 1, в значительной степени справедливы и здесь. Действительно, из сравнительного анализа вида кривых на рис. 3 и 1 можно прийти к следующим выводам: 1) учет подвижности и аннигиляции дислокаций леса приводит к увеличению расчетного значения скорости ползучести; 2) эффект начинает проявляться при напряжениях  $\tau \approx 0.5\tau_{кр}$ , увеличивается с ростом  $\tau$  и при  $\tau \approx 0.8\tau_{кр}$  составляет 10–15%; 3) движение дислокаций леса вносит в это увеличение больший вклад по сравнению с аннигиляцией; 4) увеличение относительной доли частиц второй фазы при сохранении постоянства плотности всех барьеров (частиц и дислокаций леса) влечет за собой ослабление эффекта.

#### Список литературы

- [1] Мартин Дж.У. Микромеханизмы дисперсионного твердения сплавов. М.: Металлургия, 1983. 167 с.
- [2] Пятилетов Ю.С., Ибрагимова Д.Ш. // ФММ. 1991. № 12.
- [3] Foreman J.E., Makin M.J. // Phil. Mag. 1966. Vol. 14. P. 911–924.
- [4] Курсанов В.В., Тюпкина О.Г. Препринт ИЯФ АН КазССР. № 6-81. Алма-Ата, 1981. 42 с.
- [5] Курсанов В.В., Пятилетов Ю.С., Тюпкина О.Г. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 5. Вып. 6. С. 1183–1186.
- [6] Vement A.J. // J. Rev. Roum. Phys. 1972. Vol. 17. P. 361–380.

Институт ядерной физики  
Алма-Ата

Поступило в Редакцию  
15 декабря 1991 г.  
В окончательной редакции  
15 июня 1992 г.