

## ВЛИЯНИЕ ИСТОЧНИКОВ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА НАПРЯЖЕНИЕ КВАЗИХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ

С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, К. П. Рябошапка, Н. Н. Стеценко

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,  
Украина, 01142, г. Киев-142, пр. Акад. Вернадского 36  
e-mail: kotr@imp.kiev.ua*

Предложена и обоснована дислокационная модель потери устойчивости субмикротрещины с учетом стохастической природы дальнедействующих дислокационных полей микронапряжений. На количественном уровне описаны закономерности влияния плотности дислокаций и размеров зародышевых трещин на уровень внешних напряжений, необходимых для потери устойчивости и перехода в катастрофическое распространение субмикротрещины. Получены выражения для определения величины эффекта влияния случайных микронапряжений на макроскопическое напряжение потери устойчивости зародышевой трещины в зависимости от плотности дислокаций и размеров субмикротрещин и для прогнозирования вероятности этого эффекта. Установлены закономерности влияния пластической деформации и среднего размера зерна на величину рассматриваемого эффекта. Проанализирован вклад этого эффекта в статистический разброс макроскопического напряжения квазихрупкого разрушения. Обоснована статистическая природа последнего. Сформулирован двухпараметрический критерий Гриффитса для деформированного кристалла.

### Состояние вопроса и постановка задачи.

Причиной хрупкого и квазихрупкого разрушения является потеря устойчивости зародышевых трещин, образующихся в процессе пластической деформации [1-3]. Часто потеря устойчивости и дальнейшее распространение таких трещин анализируются в приближении бездефектной решетки и однородного поля напряжений, создаваемого внешним приложенным напряжением  $\sigma$ . В реальных кристаллах источники внутренних напряжений (например, отдельные дислокации и их ансамбли) создают дальнедействующие поля микронапряжений, которые в связи со статистическим пространственным распределением первых являются случайными. В силу малых размеров зародышевых трещин ( $a \approx 0.05 \div 1 \text{ мкм}$ ) протяженность флуктуаций микронапряжений может оказываться того же порядка что и размер субмикротрещин, что существенно повлияет на устойчивость последних.

Если плотность дислокаций  $\rho \approx 10^{12} \text{ м}^{-2}$ , то их распределение с хорошим приближением описывается статистически однородным хаотическим ансамблем одиночных дислокаций.

Рассматривается простейшая дислокационная структура - ансамбль хаотически распределенных прямолинейных дислокаций. Дислокации распределены с постоянной скалярной плотностью  $\rho^+ = \rho^-$  и расположены параллельно друг другу и оси двумерной трещины. Среднее значение напряжений, обусловленных ансамблем хаотически распределенных дислокаций, равно нулю. "Амплитуда" напряжений в каждой точке кристалла определяется флуктуациями поля микронапряжений и зависит от плотности дислокаций [4].

Разрушение кристалла произойдет, если в суммарном поле упругих внешних напряжений и локальных флуктуаций микронапряжений, создаваемых дислокационным ансамблем, возникнут силовые условия потери устойчивости *одной* зародышевой трещины, *наиболее благоприятно ориентированной* по отношению к локальным растягивающим напряжениям.

В работе проведен статистический анализ процесса потери устойчивости зародышевых трещин в случайных полях хаотически распределенных прямолинейных дислокаций.

#### Критические интервалы эффекта влияния.

Одним из актуальных вопросов рассматриваемой задачи является определение интервала плотностей дислокаций,  $[\rho_c^{\min}; \rho_c^{\max}]$ , при которых случайные поля микронапряжений *в принципе могут* оказывать влияние на зародышевую трещину.

Минимальная и максимальная плотности дислокаций получаются из следующих условий ( $N(\sigma_c)$  – среднее количество флуктуаций;  $\langle L \rangle$  – средний размер флуктуации; обе характеристики зависят от плотности дислокаций) [4]:

$$N(\sigma_c) \geq 1, \quad (1)$$

$$\langle L \rangle \geq a_c. \quad (2)$$

Условие (1) требует, чтобы “амплитуда” флуктуаций превышала заданный уровень напряжений (т.е. чтобы существовала хотя бы одна флуктуация с необходимой “амплитудой”), а условие (2) – чтобы протяженность такой флуктуации не была меньше длины субмикротрещины. Таким образом (1) и (2) – в первом приближении необходимые условия влияния флуктуации микронапряжений на субмикротрещину. Сразу же отметим, что условие (1) – *минимально необходимое*, формальное, т.к. требуется еще “совпадение” флуктуации и субмикротрещины в пространстве, а поскольку вероятность “совпадения” субмикротрещины с единственной флуктуацией в пределах зерна близка к нулю (меньше  $10^{-6}$ ), то *реально* флуктуаций должно быть значительно больше  $N(\sigma) \geq 1$ :

$$N(\sigma_c) \geq n, \quad n \cong 100. \quad (3)$$

Из (3) получаем *минимальное* значение плотности дислокаций, при котором флуктуации воздействуют на трещину,  $\rho_c^{\min}$ , а из (2) – соответствующую *максимальную* плотность дислокаций  $\rho_c^{\max}$  [4].

На рис.1 изображены  $\rho_c^{\min}$  и  $\rho_c^{\max}$  как функции длины трещины  $a_c$ . Точка их пересечения определяет *две критические величины* –  $a_c^{\max}$  и  $\rho_c$ , смысл которых следующий: для любого значения  $a_c \leq a_c^{\max}$  существует “*опасный*” *интервал плотностей дислокаций*, для которых микронапряжения оказывают влияние на субмикротрещину. Очевидно, что с ростом длины трещины этот интервал сужается и смещается в область более низких плотностей дислокаций. Для трещин, размеры которых *больше*  $a_c^{\max}$ , “*опасного*” интервала плотностей дислокаций не существует [4].

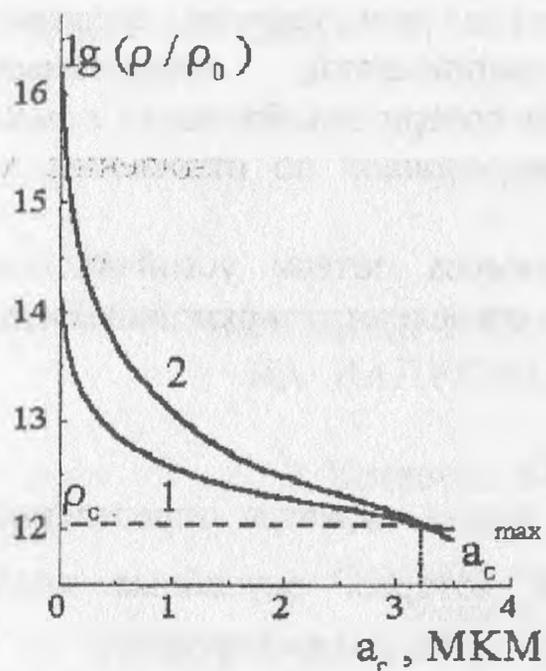


Рис.1. Плотности дислокаций  $\rho_c^{\min}$  и  $\rho_c^{\max}$  как функции длины трещины  $a_c$  ( $\rho_0 = 1 \text{ м}^{-2}$ ).

#### Снижение макроскопического напряжения потери устойчивости субмикротрещины.

Существует однозначная связь между относительной “амплитудой” флуктуации  $\frac{\delta\sigma_c}{\sigma_c} = \frac{\sigma_c - \sigma_{\text{EXT}}}{\sigma_c} = \sigma^*$  и ее относительной протяженностью  $\frac{a_c + \delta L_c}{a_c}$ , при которых зародышевые трещины размером  $a_c$  будут катастрофически распространяться в кристалле при внешнем напряжении  $\sigma_{\text{EXT}} \leq \sigma_c$ , т.е. будем иметь *снижение макроскопического критического напряжения* для этих трещин на величину “амплитуды” флуктуации:

$$\frac{\sigma_{\text{EXT}}}{\sigma_c} = 1 - \sigma^*. \quad (4)$$

Величина  $\sigma^*$  зависит от скалярной плотности дислокаций и размера трещины. С уменьшением длины трещины степень снижения макроскопического напряжения потери устойчивости субмикротрещины увеличивается, т.е. малые трещины испытывают более сильное влияние флуктуаций напряжений хаотически распределенных дислокаций. При заданной длине трещины зависимость степени снижения критического значения приложенного напряжения от плотности дислокаций *не является монотонной* (рис.2) [5].

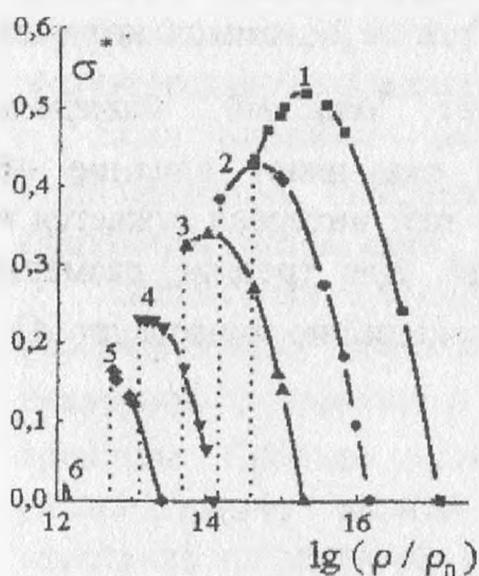


Рис.2. Зависимость  $\sigma^*$  от плотности дислокаций для различных  $a_c \leq a_c^{\max}$  (в мкм):

1 –  $\approx 0,01$ ; 2 –  $\approx 0,029$ ; 3 –  $\approx 0,08$ ; 4 –  $\approx 0,32$ ; 5 –  $\approx 0,72$ ;  
6 –  $\approx 2,9$ .

Полученный результат *отличается* от результата, полученного Корнюшиным в рамках энергетического подхода, согласно которому микронапряжения, создаваемые хаотически распределенными дислокациями, влияют на трещину *любой* длины и при *любой* плотности дислокаций, при этом *величина эффекта монотонно возрастает с увеличением плотности дислокаций по закону*  $\sigma^* = 1 - \sqrt{1 - \lambda}$  [6]. Энергетический подход дает верхнюю оценку рассматриваемого эффекта. Результаты, полученные в настоящей работе, позволяют оценить эффект *снизу*. Последнее обусловлено тем, что флуктуации, имеющие среднюю протяженность  $\langle L \rangle \leq a_c$ , не рассматриваются.

В кристалле существуют области как растягивающих, так и сжимающих напряжений – “отрицательные” флуктуации. Учет влияния флуктуаций сжимающих напряжений приводит к тому, что зависимость  $\sigma^*$  от плотности дислокаций для каждой трещины распадается на семейство зависимостей, каждой из которых соответствует определенное соотношение амплитуд положительной и отрицательной флуктуации  $\omega$  [7]. Для каждой длины субмикротрещины имеем *не одну кривую* (как на рис.2), а *семейство кривых*; такое семейство для трещины длиной  $\approx 0,08$  мкм и значений  $\omega = 0, 1, 2, 3, 9$  показано на рис.3. Для поля хаотически распределенных дислокаций появление флуктуаций растягивающих и сжимающих напряжений с заданными амплитудами – события статистически независимые, поэтому вероятность одновременного появления этих флуктуаций в области трещины есть произведение вероятностей этих событий. На рис.4 показано такое семейство вероятностей для зародышевой трещины в  $\alpha$ -Fe, равной  $\approx 0,08$  мкм. Очевидно, что с уменьшением  $\sigma^*$ , вероятность этого события увеличивается.

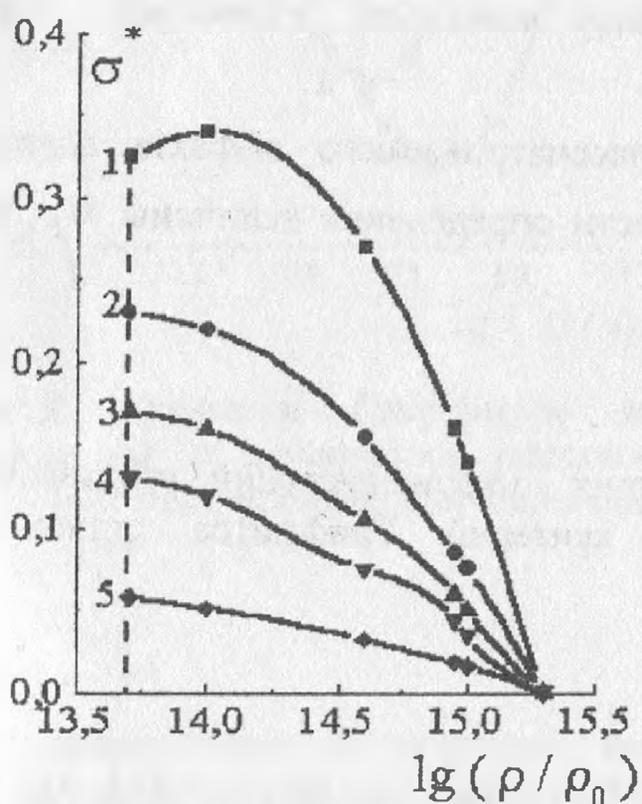


Рис.3. Семейство зависимостей  $\sigma^*$  для зародышевой трещины размером 0,08 мкм (1 –  $\omega = 0$ ; 2 –  $\omega = 1$ ; 3 –  $\omega = 2$ ; 4 –  $\omega = 3$ ; 5 –  $\omega = 9$ ).

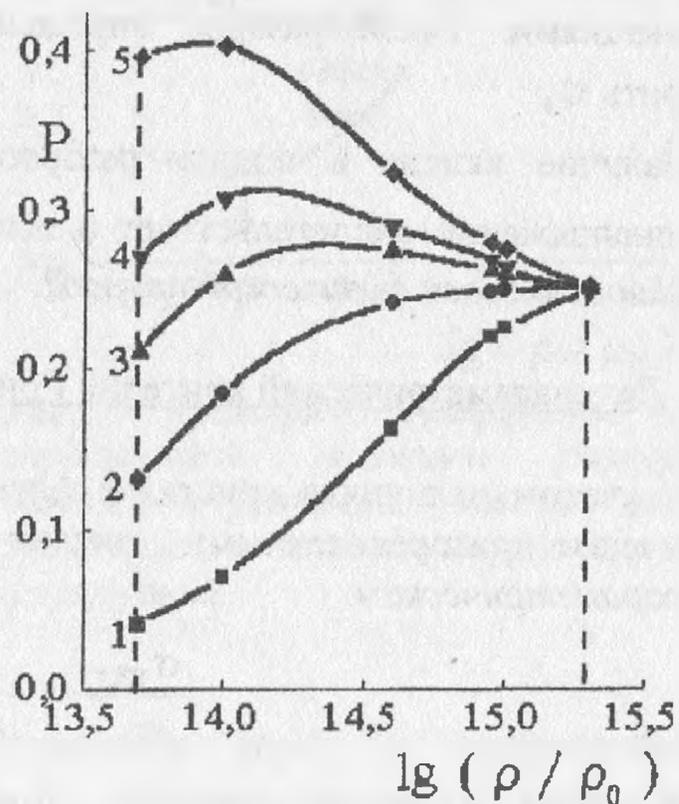


Рис.4. Вероятности  $P$  событий, изображенных на рис.3.

### Статистический характер напряжения квазихрупкого разрушения.

Если известны размер зародышевой трещины  $a_c$  и плотность дислокаций  $\rho$ , то можно оценить вероятность того, что эта трещина потеряет устойчивость и начнет распространяться при внешнем напряжении  $\sigma_{EXT}$ , меньшем того, что предсказывается для нее формулой Гриффитса  $\sigma_c$ , на любую величину, не превышающую соответствующее ей значение  $\sigma^* \cdot \sigma_c$ , если только  $a_c \leq a_c^{max}$ , а  $\rho \in [\rho_c^{min}; \rho_c^{max}]$  для этой трещины (рис.5,6.). Этот эффект ( $\sigma^*$ ) определяет *полосу разброса значений внешнего напряжения потери устойчивости зародышевой трещины*  $\sigma_{EXT}$ . Его верхняя граница, для любого  $a_c$  одна –  $\sigma_{EXT}^{max} = \sigma_c$ , определяемое по формуле Гриффитса, а нижняя –  $\sigma_{EXT}^{min} = \sigma_c (1 - \sigma^*)$ , где  $\sigma^*$  различно для различных  $a_c$  и  $\rho$ . Поскольку случайные микронапряжения, создаваемые дислокационной структурой, присутствуют в кристалле *всегда*, то их влияние на величину  $\sigma_{EXT}$  – *фактор, действующий постоянно*, а поэтому существование полосы разброса  $\Delta \sigma_{EXT} = \sigma_{EXT}^{max} - \sigma_{EXT}^{min} = \sigma^*$ , т.е. *случайный характер* – неотъемлемое “свойство”  $\sigma_{EXT}$ .

Разброс экспериментальных данных напряжения квазихрупкого разрушения  $\sigma_F$  используемых в технике металлов и сплавов связан со многими факторами. *Одной из составляющих* этого разброса *может быть* разброс макроскопического напряжения потери устойчивости зародышевой трещины  $\Delta \sigma_{EXT} = \sigma^*$ , вызванный влиянием флуктуаций случайных микронапряжений, создаваемых хаотически распределенными дислокациями. Такой разброс определяет *границу точности*, с которой можно измерить  $\sigma_F$ .

Наличие вклада в полосу разброса  $\sigma_F$  рассматриваемого эффекта влияния микронапряжений свидетельствует о необходимости определения величины  $\sigma_F$ , как *случайной по своей физической природе*.

### Двухпараметрический критерий Гриффитса.

С учетом наличия в кристалле флуктуирующих микронапряжений, создаваемых хаотически распределенными дислокациями, критерий Гриффитса становится *двухпараметрическим*:

$$\frac{\sigma_{EXT}}{\sigma_c} = \frac{\sqrt{a_c}}{\sqrt{\langle L \rangle}} \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что  $\sigma_{EXT} = f(a_c, \langle L \rangle) = f(a_c, \rho) = f(d_g, \rho) = f(d_g, \varepsilon)$ , т.е. критическое напряжение начала распространения зародышевой трещины в кристалле определяется не только длиной этой трещины (т.е. размером зерна  $d_g$ , т.к.  $a_c \approx 0.005 \times d_g$  [8,9]), но и протяженностью критической флуктуации, которая, в свою очередь, зависит от дислокационной структуры металла и, следовательно, от степени его пластической деформации  $\varepsilon$ . Примеры зависимостей  $\sigma_{EXT} = f(a_c, \rho)$  представлены на рис.5, 6. Прямая 0 представляет собой *классический однопараметрический критерий Гриффитса*, не учитывающий наличие в материале дислокационной структуры:

$\sigma_{\text{EXT}} = \sigma_c$ , т.е. напряжение потери устойчивости зародышевой трещины и есть напряжение Гриффитса, которое зависит от длины трещины. Как только начинают учитываться дислокационные микронапряжения, отношение  $\sigma_{\text{EXT}} / \sigma_c$  сразу же начинает отклоняться от 1, и это отклонение оказывается различным при различных плотностях дислокаций. Фактически, в критерии появляется *второй параметр* – средний размер флуктуации, а через него – плотность дислокаций. При этом и длина трещины проявляет себя “двухфакторно”, а именно: она определяет не только “базовый” уровень макронапряжения потери устойчивости этой трещины, но и то, как будет проявляться влияние дислокационной структуры на эту трещину (т.е. область влияния и абсолютную величину эффекта влияния). Кривые 1 ÷ 6 – это критерий Гриффитса для различных размеров зародышевых трещин от  $\approx 0,01$  мкм до  $\approx 2,9$  мкм (рис.5) и для различных значений параметра  $\omega$  (трещина длиной  $\approx 0,08$  мкм, рис.6), учитывающий влияние дислокационных микронапряжений. Для трещин, размеры которых больше  $\approx 3,25$  мкм, такого влияния не существует, т.е. отклонение  $\sigma_{\text{EXT}}$  от  $\sigma_c$  исчезает и критерий Гриффитса опять становится однопараметрическим, не зависящим от плотности дислокаций.

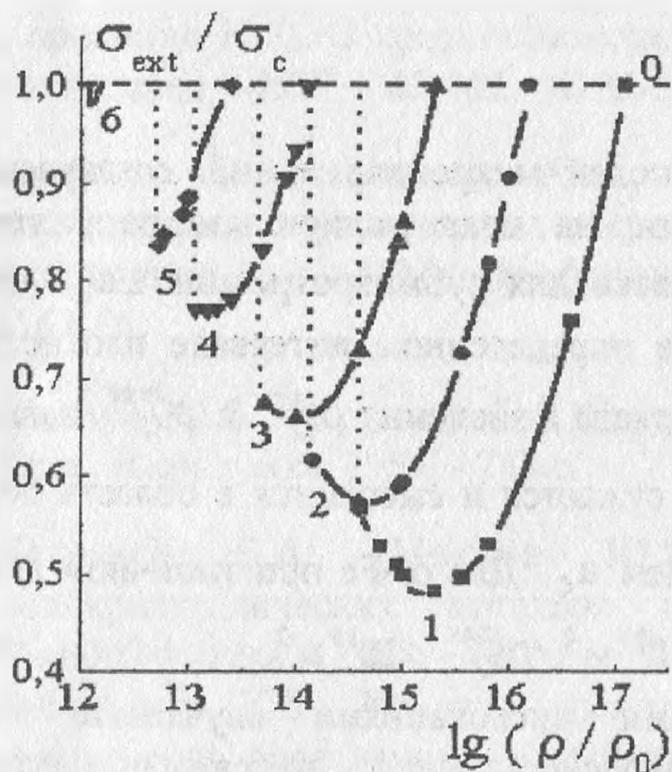


Рис.5. Критерий Гриффитса для кристалла с хаотически распределенными дислокациями для различных  $a_c \leq a_c^{\text{max}}$ .

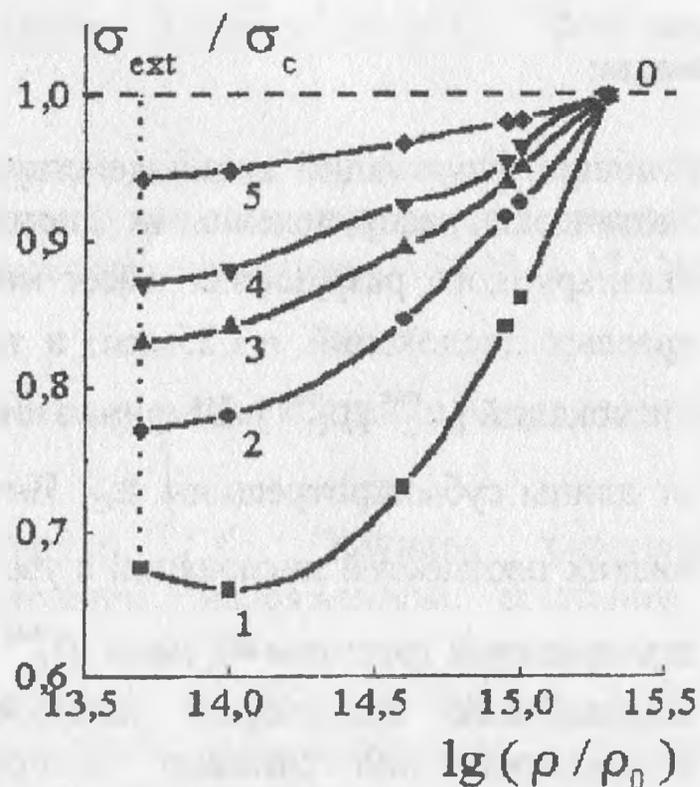


Рис.6. Критерий Гриффитса для зародышевой трещины размером 0,08 мкм и различных величин относительных амплитуд отрицательных флуктуаций.

Установлено, что в типичном интервале размеров зерен (и, соответственно, зародышевых трещин) влияние флуктуаций микронапряжений, создаваемых дислокационной структурой, имеет место при плотностях дислокаций, которые соответствуют интервалу величин пластической деформации приблизительно от 1,28% до 14% (1÷10% – стадия пластической деформации, соответствующая хрупкому разрушению малоуглеродистых сталей). С другой стороны, рассчитано, что пластические деформации приблизительно от 3,5% до 6% соответствуют плотностям дислокаций, которые “опасны” практически для всего типичного интервала размеров зерен, а пластические деформации, меньшие 1% и большие 10%, “опасны” только для структур с размерами зерен, которые, соответственно,  $\geq 100$  мкм и  $\leq 10$  мкм.

### Возможные особенности в материалах с различными микроструктурными состояниями.

Дальнодействующие поля упругих напряжений, создаваемые различными дислокационными структурами, обладают различными характеристиками. В результате эволюции таких структур в процессе серии механических и термических обработок можно получать различные прочностные свойства реальных материалов [10].

Можно предсказать оптимальные микро- и мезоскопические состояния, которые обеспечивают максимально благоприятные прочностные свойства поликристаллических материалов. Так, в случае корреляции дислокаций в ансамбле флуктуации микронапряжений существенно уменьшаются, и, следовательно, уменьшается их влияние на макроскопическое напряжение  $\sigma_F$ . Еще большее улучшение прочностных свойств должно наблюдаться при образовании блочной или ячеистой структуры. Наличие ротационных мод и дисклинаций должно приводить к максимальному уменьшению снижения макроскопического напряжения скола  $\sigma_F$  [10].

#### **Выводы:**

1. Влияние флуктуаций дальнодействующих полей микронапряжений, создаваемых хаотически распределенными дислокациями, на макроскопическое напряжение квазихрупкого разрушения имеет место только для субмикротрещин  $\leq a_c^{\max}$  (для краевых дислокаций  $\approx 3,25 \mu\text{м}$ ) и только в определенном интервале плотностей дислокаций  $[\rho_c^{\min}; \rho_c^{\max}]$ . Ширина этого интервала и значения  $\rho_c^{\min}$  и  $\rho_c^{\max}$  зависят от длины субмикротрещины  $a_c$ . Интервал сужается и смещается в область более низких плотностей дислокаций с увеличением  $a_c$ . Для  $\alpha\text{-Fe}$  при типичной длине зародышевой трещины  $\approx 0,1 \mu\text{м}$ :  $\rho_c^{\min} \approx 3,5 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$ ,  $\rho_c^{\max} \approx 10^{15} \text{ м}^{-2}$ .
2. Создаваемые хаотически распределенными дислокациями случайные поля микронапряжений снижают величину макроскопического напряжения потери устойчивости зародышевой трещины в кристалле  $\sigma_{\text{EXT}}$ . Величина этого эффекта  $\sigma^*$  зависит от размера зародышевой трещины и от плотности дислокаций. Сжимающие микронапряжения уменьшают  $\sigma^*$  в среднем в 1,5 раза. Вероятность эффекта  $\sigma^*$  составляет в среднем от 5 до 15%, увеличиваясь с уменьшением размера трещины.
3. Напряжение квазихрупкого разрушения  $\sigma_F$ , как  $\sigma_{\text{EXT}}$ , является величиной, статистической по своей природе. Максимальное значение  $\sigma^*$  определяет минимальную ширину полосы разброса  $\sigma_{\text{EXT}}$ , а, значит, и  $\sigma_F$ .
4. Критерий Гриффитса в деформированном кристалле является двухпараметрическим, т.е. зависящим от параметров зеренной и дислокационной структуры металла.

## Список литературы

1. Stroh A.N. The formation of cracks as a result of plastic flow // Proc. Roy. Soc. - 1954. - A223, N1154. - P.404-420.
2. Cottrell A.H. Theory of brittle fracture in steel and similar metals // Trans. Met. Soc. AIME. - 1958. - 212, N2. - P. 192-198.
3. Stroh A.N. A theory of the fracture of metals // Adv. Phys. - 1957. - 6, N24. - P.418-440.
4. Котречко С.А., Мешков Ю.Я., Рябошапка К.П., Стеценко Н.Н. О влиянии флуктуаций микронапряжений на потерю устойчивости зародышевых трещин // Металлофизика и новейшие технологии. - 1995. - 17, №1. - С.51-55.
5. Котречко С.А., Мешков Ю.Я., Рябошапка К.П., Стеценко Н.Н. Распространение субмикротрещин в решетке, содержащей хаотически распределенные дислокации // Металлофизика и новейшие технологии. - 1995. - 17, №2. - С.56-58.
6. Корнюшин Ю.В. О критическом размере плоской хрупкой трещины // Физ. мет. и металловед. - 1977. - 43, №1. - С.33-37.
7. Котречко С.А., Мешков Ю.Я., Рябошапка К.П., Стеценко Н.Н. Влияние отрицательных флуктуации микронапряжений на величину макроскопического напряжения скола // Металлофизика и новейшие технологии. - 1995. - 17, №5. - С.63-66.
8. Мешков Ю.Я., Пахаренко Г.А. Структура металла и хрупкость стальных изделий. - Киев: Наук.думка, 1985. - 268 с.
9. Котречко С.А., Мешков Ю.Я., Меттус Г.С. Хрупкое разрушение поликристаллических металлов при сложном напряженном состоянии // Металлофизика. - 1988. - 10, №6. - С.46-55.
10. Рябошапка К.П. Влияние дальнедействующих полей собственных упругих напряжений дислокации на потерю устойчивости субмикротрещин и величину макроскопического напряжения скола поликристаллических металлов // Металлофизика и новейшие технологии. - 1996. - 18, №9. - С.73-79.