

УДК 539

## ПРОДВИЖЕНИЕ ФРОНТА ТРЕЩИНЫ ПРИ МЕЖКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ СПЛАВА ЖЕЛЕЗА С КРЕМНИЕМ

В. Лу, Ж. Чен, Ю. Кьяо

Калифорнийский университет, CA 92093-0085 Сан-Диего, США  
E-mail: yqiao@ucsd.edu

На основе анализа захвата трещины “хребтами” разрушения и процесса проникания фронта сегмента трещины в сплаве железа с кремнием исследуется влияние на распространение трещины расстояния между точками проникания вдоль высокоугловой границы. Установлено, что если точки проникания расположены близко друг к другу, то доминирует механизм захвата трещины, в противном случае определяющим в процессе распространения фронта является разделение границы зерна в “окнах” разрушения. Показано, что зависимость между сопротивлением общему разрушению границы зерна и расстоянием между точками проникания является очень сложной. Минимальное сопротивление границы зерна имеет место в том случае, когда расстояние между точками проникания, которое зависит как от прочности границы зерна на сдвиг, кристаллографической прочности и кристаллографической ориентации, так и от формы профиля фронта трещины, приближенно равно 2–3 мкм.

Ключевые слова: граница зерна, сопротивление разрушению, ветвление трещины.

**Введение.** В экспериментальных исследованиях ветвления трещин в поликристаллических материалах [1–4] обнаружено, что при преодолении высокоугловых границ зерен оно происходит путем разветвления фронта трещины. Если интенсивность напряжений в вершине трещины невелика, то фронт трещины стабильно проникает через границу. Проникание сегмента фронта в следующее зерно сопровождается его изломом. С увеличением внешней нагрузки глубина проникания и ширина “окна” проникания увеличиваются. Точки проникания расположены достаточно равномерно вдоль границы, однако расстояние между ними может быть достаточно большим. При увеличении движущей силы (скорости освобождения энергии)  $G$  до критического значения процесс ветвления трещины заканчивается и начинается неустойчивое движение ее фронта.

Знание факторов, обуславливающих прочность границ зерен, позволит повысить сопротивление разрушению хрупких поликристаллических материалов, для которых внутрикристаллическое разрушение является основной формой разрушения. Например, в классической механике разрушения часто предполагается, что разрушение хрупких материалов обусловлено неустойчивым развитием одной или нескольких микротрещин, имеющих размер, равный размеру зерна [5]. Микротрещины имеют такой размер, поскольку их продвижению препятствуют границы зерен, которые они должны преодолеть. Таким образом, критерий проникания трещины через границу зерна (сопротивление разрушению границы зерна) преобладает над критерием общего разрушения.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства энергетики США (грант № DE-FG02-05ER46195).

© Лу В., Чен Ж., Кьяо Ю., 2012

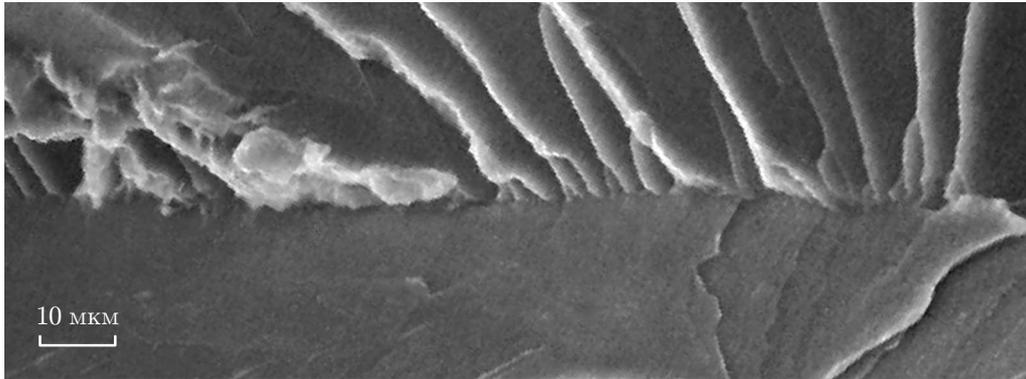


Рис. 1. Фронт разрушения при пересечении высокоугловой границы зерна в сплаве железа с кремнием, полученный методом электронной микроскопии (стрелка — направление распространения трещины)

Одним из существенных факторов, влияющих на взаимодействие фронта трещины и границы зерна, является расстояние между точками проникания  $w$ . Согласно фрактургическим исследованиям [3] для сплава железа с кремнием наиболее вероятно значение  $w = 2 \div 3$  мкм. Расстояния, меньшие 0,2 мкм, не наблюдались; на некоторых участках границы значение  $w$  могло достигать  $10 \div 80$  мкм (рис. 1). В “идеальном” случае (когда величина  $w$  бесконечно мала) точки проникания примыкают друг к другу и площадь границы зерна, через которую может двигаться фронт трещины, бесконечно мала. Поэтому требуется затратить работу на разделение точек проникания. Это позволяет объяснить тот факт, что большие значения  $w$  наблюдаются редко, но не позволяет получить ответ на вопрос, почему значения  $w$  не меньше экспериментально наблюдаемых. Следует отметить, что характерный структурный размер границы зерна значительно меньше  $2 \div 3$  мкм [6]. Кроме того, замечена аналогия между отсутствием резкого изменения направления течения реки и изменением расстояния между точками проникания, т. е. хронология движения фронта трещины через границу зерна, которая зависит от локального сопротивления разрушения, не зависит от расстояний между точками проникания в диапазоне их замеренных значений.

В настоящей работе показано, что критическое значение расстояния между точками проникания  $w_{cr}$  можно получить, учитывая как захват трещины “хребтами” разрушения, так и взаимодействие между силой, движущей трещину, и локальным сопротивлением разрушению. Другие факторы, такие как прочность границы зерна на сдвиг, кристаллографическая ориентация, сопротивление разрушению, форма профиля фронта трещины, также оказывают влияние на критическое расстояние между точками проникания.

**1. Проникание фронта трещины через высокоугловую границу зерна.** Как отмечено выше, прежде чем высокоугловая граница зерна будет полностью преодолена, фронт разрушения может проникнуть через точки проникания (рис. 2). Поскольку кристаллографическая ориентация двух зерен вдоль границы различная, фронт трещины разбивается на несколько сегментов, каждый из которых расположен вокруг точек проникания. Сегменты фронта продвигаются к границе зерна вдоль первичной плоскости разрушения. В тот момент, когда фланги двух трещин разделяются, вторичное разрушение происходит вдоль направления нормали к первичной плоскости разрушения, что приводит к формированию “речных” маркеров (“хребтов” разрушения). “Речные” маркеры определяют профиль продвижения фронта разрушения. По мере того как фронт сегмента продвигается ко второму зерну, граница зерна в окрестности точки проникания разделяется,

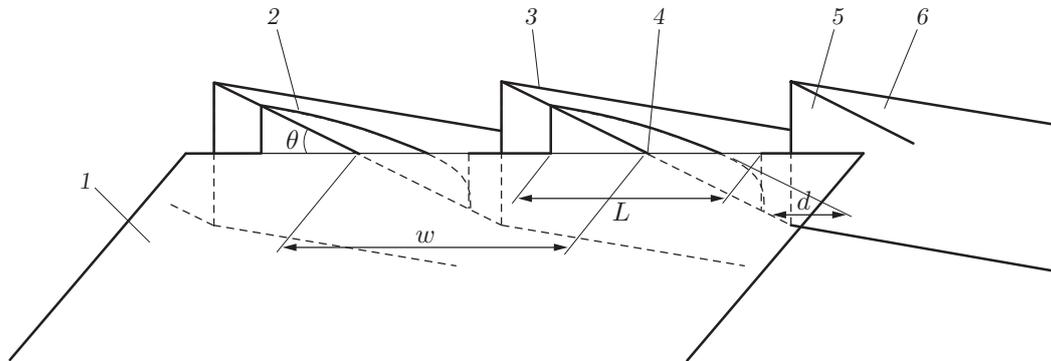


Рис. 2. Схема продвижения фронта разрушения через высокоугловую границу зерна:

1 — плоскость разрушения в первом зерне; 2 — сегмент фронта разрушения, проникающего через границу; 3 — “хребет” разрушения; 4 — точка проникания; 5 — граница зерна; 6 — плоскость разрушения во втором зерне

при этом формируется окно проникания. С использованием экспериментальных данных [7] можно получить степенную зависимость  $L/w = \alpha(d/w)^\beta$ , где  $L$  — ширина окна проникания;  $d$  — глубина проникания;  $\alpha \approx 3,5$ ;  $\beta \approx 0,6$ . Если фронт проникания непрерывный, то с увеличением скорости продвижения трещины площадь поверхности зерна, разделившейся в окне проникания, и зона растрескивания в кристаллографических плоскостях увеличиваются. Поэтому эффективное сопротивление разрушению  $R$  увеличивается, т. е. движущая трещину сила  $G$  должна увеличиваться, чтобы обеспечить продвижение сегментов. Критерий разрушения записывается в виде  $G = R$ . Заметим, что при постоянной внешней нагрузке с увеличением  $d$  значение  $G$  увеличивается. Однако сначала, когда глубина проникания фронта относительно мала,  $dG/dd < dR/dd$  и фронт трещины продвигается бесконечно малыми шагами ( $G < R$ ). В результате трещина останавливается, в то время как внешняя нагрузка продолжает увеличиваться. Эти условия обеспечивают устойчивое продвижение трещины. По мере увеличения  $d$ , когда выполняется условие  $dG/dd \geq dR/dd$ , продвижение трещины становится неустойчивым, и в тот момент, когда выполняется условие  $G > R$ , трещина продолжает развиваться. При анализе  $R$ -кривых [8] в качестве эффективного сопротивления разрушению границы зерна необходимо выбрать значение  $R$ , при котором одновременно выполняются условия  $G = R$  и  $dG/dd = dR/dd$ . Эти условия можно записать в виде [7]

$$G_R/G_b = C_1(1 + 0,12k_0C_2)^2,$$

где  $C_1 = \cos \theta (\sin \theta + \cos \theta)$ ,  $C_2 = [\sin^2 \theta \cos^2 \theta \cos \psi / (\sin \theta + \cos \theta)]^{1,05}$  — параметры, зависящие от кристаллографической разориентации вдоль границы;  $\theta$ ,  $\psi$  — углы поворота и наклона разориентации соответственно;  $G_b = G_{ICSC} / (\cos \theta \cos \psi)$  — эффективное сопротивление разрушению зерна перед границей;  $G_{ICSC}$  — кристаллографическое сопротивление разрушению;  $k_0 = [(a_0/w)^m (\alpha^3/8)(k/\mu)(kw/G_{ICSC})]^{1,05}$ ;  $a_0$  — начальная длина трещины;  $k$  — эффективная прочность на сдвиг границы зерна;  $m = 3\beta - 1$ ;  $\mu$  — эффективный модуль сдвига. Согласно данным [3] для сплава железа с кремнием  $k = 144$  МПа,  $k/\mu \approx 0,1$  %,  $a_0 = 60$  мм,  $G_{ICSC} = 850$  Дж/м. Можно показать, что величина  $G_R$  — возрастающая функция  $w$  (рис. 3). Значения  $\theta$  и  $\psi$  приняты равными средним значениям в интервале их изменения, т. е.  $\theta = 22,5^\circ$ ,  $\psi = 22,5^\circ$ .

Поскольку при проникании фронта через границу в окне проникания граница может самопроизвольно разделяться, разрушение ее части на вторичной поверхности разрушения должно происходить путем сдвига. В точке пересечения двух уступов разрушения

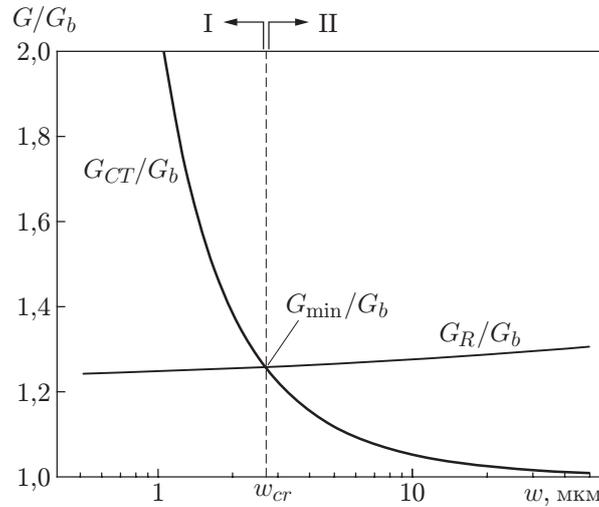


Рис. 3. Области с различными механизмами разделения границы зерна:  
 I — область, в которой определяющую роль играет захват трещины; II — область, в которой определяющую роль играют  $R$ -кривые

первичная плоскость разрушения разрывна и продвижение фронта в плоскости зерна, которое можно рассматривать как разрушение по третьей моде, прекращается. Таким образом, “хребты” разрушения на границе могут действовать как элементы, локально скрепляющие два фланга фронта разрушения, что создает дополнительное сопротивление разрушению. При проникании фронта сегмента между двумя “хребтами” локальная интенсивность напряжений в выступающей части меньше номинального значения [9]. Избыток движущей силы вызван наличием “хребтов” разрушения, расположенных позади продвигающегося фронта. Для того чтобы обеспечить продвижение фронта трещины, локальная движущая сила должна быть равна локальному сопротивлению разрушения, а значение  $G_b$  (константа материала) — больше номинальной интенсивности напряжений в вершине трещины. В противном случае фронт остановится. Следовательно, для кристаллического материала эффективное сопротивление разрушению выше, чем для однородного материала. В тот момент, когда два сегмента фронта по обе стороны хребта сливаются (подобное явление происходит при распространении трещины в подкрепленных композициях [10, 11]), граница зерна разламывается. На основе энергетического анализа [12] можно вычислить критическое значение скорости высвобождающейся энергии, необходимой для преодоления захвата трещины “хребтом”:

$$\frac{G_{CT}}{G_b} = \left(1 - \frac{D}{w}\right) + \left[1,7 + 2,4 \frac{D}{w} + 0,1 \left(\frac{D}{w}\right)^2\right]^2 \frac{D}{w}.$$

Здесь  $D$  — ширина разрушающегося “хребта”, которая согласно результатам фрактографического анализа для сплава железа с кремнием приблизительно равна 0,25 мкм. Зависимость сопротивления разрушению границы зерна  $G_{CT}$ , обусловленного захватом трещины “хребтом” разрушения, от величины  $w$  показана на рис. 3. С увеличением  $w$  значение  $G_{CT}$  уменьшается. Это может быть обусловлено тем, что в случае, когда точки проникания расположены близко друг к другу, вдоль границы образуется большое количество “хребтов” разрушения.

**2. Расстояние между точками проникания и сопротивление разрушению границы зерна.** Как отмечено выше, существует два механизма разделения границы зерна: спонтанное разделение границы зерна в окнах проникания вследствие продвижения трещины и сдвиг границы зерна на “хребтах” разрушения. Граница преодолевается пол-

ностью только в том случае, если действуют оба механизма. Заметим, что этим механизмам соответствуют различные зависимости  $w$  от сопротивления границы зерна. В случае когда величина  $w$  относительно мала,  $G_{CT}$  быстро уменьшается с увеличением  $w$  и стремится к  $G_b$  тогда, когда величина  $w$  становится относительно большой. В то же время с увеличением  $w$   $G_R$  увеличивается, однако скорость увеличения мала по сравнению со скоростью уменьшения  $G_{CT}$  в небольшом диапазоне значений  $w$ . При критическом значении  $w_{cr} = 2,6$  мкм выполняется равенство  $G_{CT} = G_R$ . При значениях  $w < w_{cr}$  выполняется неравенство  $G_{CT} > G_R$ . В этом случае в тот момент, когда номинальная скорость высвобождения энергии  $G$  достигает значения  $G_R$ , граница зерна разрушается в окне разрушения, в то время как величина  $G$  должна продолжать увеличиваться до значения  $G_{CT}$ , для того чтобы произошло разделение границы зерна на “хребте” разрушения. Таким образом, эффективное сопротивление разрушению границы зерна  $G_{GB} = G_{CT}$ , т. е. механизм разрушения границы зерна доминирует по сравнению с механизмом захвата трещины. В случае когда  $w > w_{cr}$ ,  $G_{CT} < G_R$ , т. е. если  $G = G_R$ , фронт трещины становится неустойчивым в окне разрушения, и “хребты” разрушения могут быть преодолены. Поэтому в качестве эффективного сопротивления разрушению границы зерна нужно выбрать величину  $G_R$ , так как в этом случае разрушение границы определяется критическим условием неустойчивого проникания сегментов трещины.

В случае когда  $w = w_{cr}$ , сопротивление разрушению границы зерна минимальное. Это свидетельствует о том, что величина  $w_{cr}$  энергетически наиболее предпочтительна для расстояний между точками проникания, при которых фронт разрушения движется через границу зерна. Минимальное значение  $G_{min}$  приблизительно равно  $1,3G_b$  и близко к экспериментальным значениям сопротивления разрушению границы зерна, а значение  $w_{cr}$  хорошо согласуется с экспериментальными данными о распределении расстояний между точками проникания [3].

Величина  $G_{GB} = G_{CT}$  существенно увеличивается, когда  $w$  уменьшается от значения  $w_{cr}$ . При  $w = 1$  мкм значение  $G_{GB}$  приблизительно в два раза превышает значение  $G_{min}$ . Поэтому маловероятно, что расстояние между точками проникания может быть меньше значения  $w_{cr}$ . Даже если сначала расстояние между точками проникания меньше значения  $w_{cr}$ , из-за сложности разрушения “хребтов” сдвигом относительно большое сопротивление разрушению вследствие малости расстояний между точками проникания будет уменьшаться до тех пор, пока расстояние между точками проникания не достигнет значения  $w_{cr}$ , при котором разрушение “хребтов” и разделение в окнах проникания будут происходить при одной и той же скорости высвобождения энергии.

С увеличением  $w$  от значения  $w_{cr}$  эффективное сопротивление разрушению  $G_{GB} = G_b$  увеличивается, поэтому если точки проникания находятся на большом расстоянии друг от друга, то требуется большая скорость высвобождения энергии. Если внешняя нагрузка увеличивается, то фронт разрушения может проникнуть через большее число точек проникания на границе, т. е. при меньшем расстоянии  $w$  между ними. Поскольку с уменьшением  $w$   $G_{GB}$  уменьшается, энергетический барьер, препятствующий прохождению трещины через границу зерна, также уменьшается. При  $G = G_{GB}$  процесс разрушения, происходящий как вследствие прохождения трещины через окна проникания, так и вследствие разрушения “хребтов”, заканчивается. Заметим, что при  $w < w_{cr}$  изменение скорости  $G_R$  существенно меньше изменения скорости  $G_{CT}$ . Таким образом, в эксперименте иногда могут наблюдаться большие значения  $w$  (см. рис. 1), поскольку увеличение сопротивления разрушению может быть компенсировано локальным увеличением движущей трещину силы.

Помимо расстояния между точками проникания имеются другие величины, оказывающие влияние на  $G_R$ , например эффективная прочность на сдвиг границы зерна  $k$  и

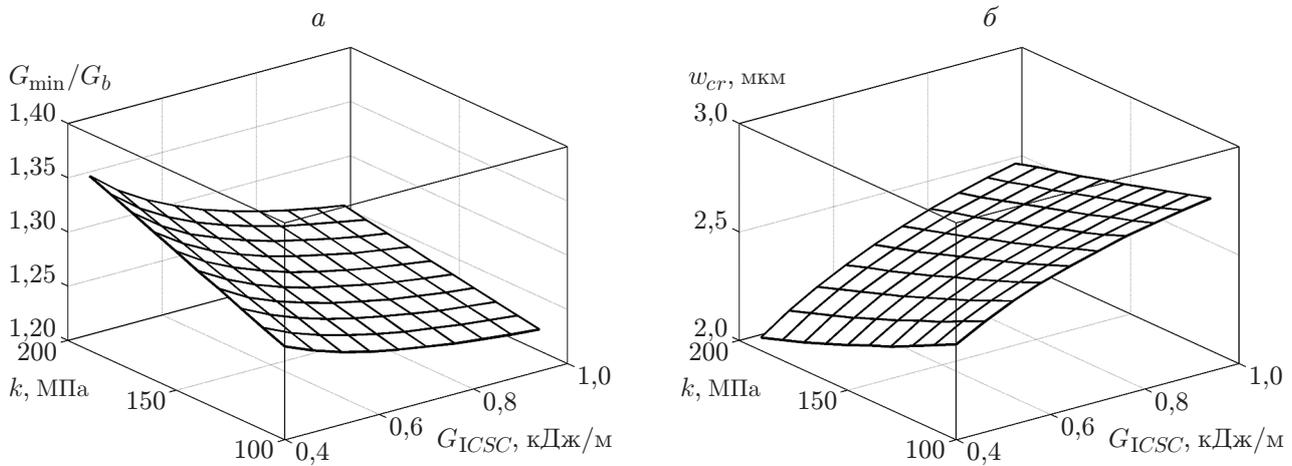


Рис. 4. Зависимости минимального сопротивления границы зерна (*a*) и расстояния между точками проникания (*б*) от величин  $k$  и  $G_{ICSC}$

эффективная работа по разделению кристаллографических плоскостей  $G_{ICSC}$ . Влияние этих величин на величины  $G_{\min}$  и  $w_{cr}$  показано на рис. 4, *a, б* соответственно. С увеличением  $G_{ICSC}$  необходимо затрачивать бóльшую работу на разделение кристаллографических плоскостей, поэтому влияние границы зерна уменьшается, следствием чего является убывание зависимости сопротивления прочности от величин  $k$  и  $G_{ICSC}$ . Это означает, что с увеличением кристаллографической прочности распространение фронта через окна проникания становится менее сложным по сравнению с его продвижением в первичной плоскости разрушения, и параметр  $k_0$  уменьшается так же, как  $G_R$ . Поэтому значение  $G_{\min}$  уменьшается, в то время как значение  $w_{cr}$  увеличивается, т. е. расстояние между точками проникания увеличивается. Заметим, что влияние величины  $G_{ICSC}$  на  $G_{GB}$  проявляется только в случае, если  $w > w_{cr}$ . При малых значениях  $w$  эта величина не оказывает влияния на  $G_{CT}$ -кривые.

Если прочность на сдвиг границы зерна увеличивается и, следовательно, продвижение фронта через окно проникания затрудняется, то значение  $G_{\min}$  возрастает. Соответственно значение  $w_{cr}$  уменьшается, и при одной и той же интенсивности напряжений площадь разделенной границы зерна уменьшается, вследствие чего расстояние между точками проникания должно уменьшаться, иначе граница зерна не будет полностью разделена. Подобно кристаллографической прочности на разрушение влияние коэффициента  $k$  существенно только при  $w > w_{cr}$ . В случае когда расстояние между точками проникания относительно мало, захват трещины становится определяющим и поведение трещины в окне проникания становится несущественным. Заметим, что влияние коэффициента  $k$  на  $G_{\min}$  и  $w_{cr}$  более существенно, чем влияние  $G_{ICSC}$ . Это может быть объяснено тем, что коэффициент  $k$  оказывает влияние непосредственно на работу по разделению границы зерна, в то время как величина  $G_{ICSC}$  только меняет распределение работы по разделению поверхностей разрушения.

Выше предполагалось, что профиль фронта трещины, проникающей через границу зерна, известен. Согласно экспериментальным данным [7] геометрический коэффициент  $\beta > 0,5$  ( $\beta \approx 0,6$ ), т. е. проникающий фронт сегмента “уже” и “острее”, чем полукруг. С увеличением значения  $\beta$  при одной и той же глубине проникания ширина окна проникания уменьшается, поэтому, для того чтобы граница зерна была полностью разделена, передняя часть фронта трещины должна глубже проникнуть в зерно. С уменьшением расстояния между точками проникания зависимость  $w_{cr}(\beta)$  убывает (пунктирная кривая на

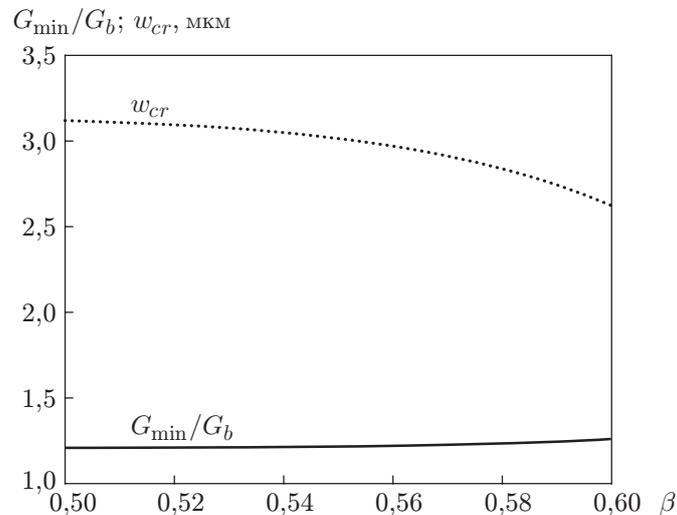


Рис. 5. Зависимости расстояния между точками проникания и минимального сопротивления границы зерна от геометрического параметра фронта разрушения

рис. 5). В этом случае, для того чтобы трещина могла проникнуть через одну и ту же границу зерна, необходимо приложить большую движущую силу, поэтому с уменьшением расстояния между точками проникания зависимость  $G_{min}(\beta)$  возрастает (сплошная кривая на рис. 5). Однако при изменении  $\beta$  изменение величин  $w_{cr}$  и  $G_{min}$  незначительно. Например, с увеличением значения  $\beta$  от 0,5 до 0,6 значение  $G_{min}/G_b$  увеличивается менее чем на 5%. Это означает, что влияние профиля фронта является менее существенным по сравнению с влиянием величин  $w$ ,  $k$ ,  $G_{ICSC}$ .

Другими важными факторами, оказывающими влияние на сопротивление разрушению второго зерна  $G_b$ , являются кристаллографическая разориентация углов вдоль границы, а также параметры ориентации  $C_1$ ,  $C_2$ . Увеличение углов  $\theta$  или  $\psi$  приводит к увеличению сопротивления разрушению границы зерна. Влияние угла закручивания еще более существенно (см. [2, 3, 7, 13]).

**Заключение.** В данной работе изучено разрушение высокоугловой границы зерна при проникании через нее ветвящейся трещины. Граница зерна в окне проникания может самопроизвольно разрушаться по мере продвижения фронта сегмента трещины к границе, а поверхность границы зерна на “хребтах” должна разрушаться путем сдвига. Первый механизм является более существенным в случае конкуренции между увеличением локального сопротивления и увеличением движущей трещину силы, второй — при захвате трещины. Влияние этих двух факторов, препятствующих продвижению трещины, должно быть устранено, для того чтобы фронт ветвящейся трещины мог проникнуть через границу зерна. Возможность проникания через границу существенно зависит от расстояния между точками проникания. Когда расстояние между точками проникания достаточно мало, разрушение границы зерна определяется механизмом захвата и эффективное сопротивление разрушению границы зерна быстро возрастает по мере уменьшения расстояния между точками проникания; когда расстояние между точками проникания относительно большое, сопротивление разрушению границы зерна, которое незначительно увеличивается с увеличением расстояния между точками проникания, определяется поведением окна прорыва. При критическом значении расстояния между точками проникания сопротивление разрушению границы зерна минимальное. Другими важными факторами являются сопротивление границы зерна сдвигу и кристаллографическая ориентация, в то время как форма профиля фронта оказывает менее существенное влияние.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Argon A. S., Qiao Y.** Resistance of cleavage cracking of high-angle bicrystal grain boundaries in Fe–Si alloy // *Philos. Mag. A.* 2002. V. 82. P. 3333–3348.
2. **Qiao Y., Argon A. S.** Cleavage crack-growth-resistance of grain boundaries in polycrystalline Fe — 2 wt% Si alloy: experiments and modeling // *Mech. Mater.* 2003. V. 35. P. 129–154.
3. **Qiao Y., Argon A. S.** Cleavage cracking resistance of high angle grain boundaries in Fe — 3 wt% Si alloy // *Mech. Mater.* 2003. V. 35. P. 313–331.
4. **Qiao Y., Argon A. S.** Brittle-to-ductile fracture transition in Fe — 3 wt% Si single crystals by thermal crack arrest // *Mech. Mater.* 2003. V. 35. P. 903–912.
5. **McClintock F. A.** Mechanical behaviors of materials / F. A. McClintock, A. S. Argon. Marietta: CBLS, 1993.
6. **Flewitt P. E. J.** Grain boundaries: their microstructures and chemistry / P. E. J. Flewitt, R. K. Wild. N. Y.: John Wiley and Sons, 2001.
7. **Qiao Y.** Modeling of resistance curve of high-angle grain boundary in Fe — 3 wt% Si alloy // *Mater. Sci. Engng. A.* 2003. V. 361. P. 350–357.
8. **Anderson T. L.** Fracture mechanics: fundamentals and applications. Boca Raton: CRC Press, 2004.
9. **Rice J. R.** First-order variation in elastic fields due to variation in location of a planar crack front // *Trans. ASME. J. Appl. Mech.* 1985. V. 52. P. 571–579.
10. **Bower A. F., Ortiz M. A.** 3-dimensional analysis of crack trapping and bridging by tough particles // *J. Mech. Phys. Solids.* 1991. V. 39, N 6. P. 815–858.
11. **Mower T. M., Argon A. S.** Experimental investigations of crack trapping in brittle heterogeneous solids // *Mech. Mater.* 1995. V. 19. P. 343–364.
12. **Kong X., Qiao Y.** Crack trapping effect of persistent grain boundary islands // *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* 2005. V. 28. P. 753–758.
13. **Qiao Y., Deliwala J. K., Chakravarthula S. S., Kong X.** High-temperature tensile properties of a polymer intercalated/exfoliated cement // *Mater. Lett.* 2005. V. 59. P. 3616–3619.

*Поступила в редакцию 19/V 2011 г.*

---