

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

## О некоторых критериальных проблемах зарождения и развития усталостных трещин в поликристаллах

Б. З. Марголин, В. А. Швецова, С. М. Балакин

ЦНИИКМ “Прометей”, Санкт-Петербург, Россия

*Рассмотрена связь между механизмами роста усталостной трещины и направлением ее развития на I и II стадиях. Представлено обоснование критериев направления распространения усталостной трещины на этих стадиях на основе анализа физических и механических особенностей развития усталостных трещин в поликристаллах. Обсуждаются условия, при выполнении которых микротрещины могут быть инициаторами хрупкого разрушения.*

**Ключевые слова:** механизм роста усталостной трещины, поликристаллы, хрупкое разрушение, микротрещины.

**Введение.** Механика и физика усталостного разрушения в настоящее время являются едва ли не самой изучаемой областью науки о прочности. Тем не менее в проблеме усталостного разрушения имеется ряд вопросов, которые не часто обсуждаются в литературе и ответы на которые далеко не очевидны.

Один из таких вопросов: изменение траектории усталостной трещины при переходе от I стадии развития усталостного разрушения ко II. Как известно, на начальной стадии усталостного разрушения, обычно обозначаемой как I стадия, трещины образуются и развиваются по плоскостям максимальных сдвиговых деформаций (рис. 1). На глубине порядка одного-двух зерен траектория усталостной трещины изменяется, далее она растет перпендикулярно к максимальным нормальным деформациям (рис. 1). Эту стадию принято обозначать как II стадия. Данные стадии усталостного разрушения характерны для поликристаллических материалов с различным типом кристаллической решетки и разной структурой [1–3].

Закономерности развития усталостных трещин на I и II стадиях изучены достаточно подробно как с точки зрения физических процессов [1, 4, 5], так и в плане механического анализа [2, 3, 6, 7]. Вместе с тем какая-либо трактовка (физическая или механическая) существования двух стадий усталостного разрушения в настоящее время, по-видимому, отсутствует. Иными словами, отсутствует объяснение перехода от I стадии ко II, не ясно, почему трещина не всегда развивается вдоль сдвиговых деформаций или перпендикулярно к максимальным нормальным деформациям.

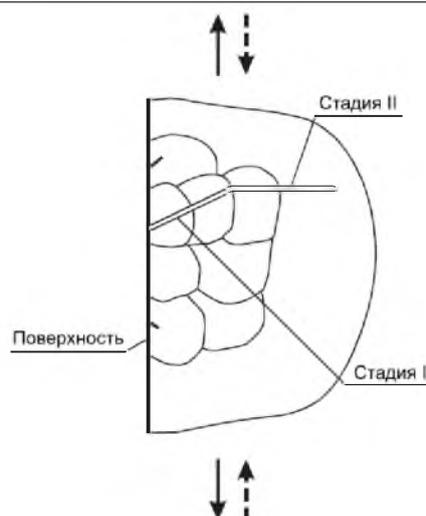


Рис. 1. Траектория трещины на I и II стадиях при циклическом нагружении растяжением-сжатием.

Следующий вопрос, который требует более детального анализа, – направление роста усталостной трещины на II стадии при смешанных модах нагружения. Как известно, направление роста усталостной трещины на данной стадии описывается критерием максимальных нормальных деформаций [3]. Этот критерий с использованием полярной системы координат с началом в вершине трещины может быть сформулирован таким образом: усталостная трещина на II стадии развивается в направлении радиуса-вектора под углом  $\theta$ , который определяется из условия

$$\Delta \varepsilon_{\theta\theta}^p = \max, \quad (1)$$

где  $\Delta \varepsilon_{\theta\theta}^p$  – размах пластической деформации. Критерий позволяет прогнозировать траекторию трещины при различных модах нагружения для разных материалов независимо от физического механизма ее роста.

Вместе с тем обоснование такого универсального критерия не является очевидным. Более того, критерий в ряде случаев противоречит следствиям из континуальной теории повреждений.

В качестве примера рассмотрим развитие усталостной трещины, подверженной II моде нагружения. Известно, что в этом случае наибольшие размахи деформаций реализуются на линии продолжения трещины. Следовательно, с точки зрения накопления усталостных повреждений максимальные повреждения также будут локализованы на этой линии, что следует из уравнения Коффина

$$\Delta \varepsilon_{eq}^p N_f^{0,5} = \text{const},$$

где  $\Delta \varepsilon_{eq}^p$  – интенсивность размахов пластической деформации;  $N_f$  – количество циклов (долговечность) до зарождения макротрещины.

Ясно, что согласно теории повреждений развитие трещины должно происходить вдоль ее продолжения. Однако экспериментально наблюдаемое развитие трещины в большинстве случаев [1–3] происходит таким образом, что она отклоняется от своего направления и растет перпендикулярно к максимальным нормальным деформациям.

В целом сформулированные выше проблемы касаются связи механизмов роста усталостной трещины с направлением ее развития и должны быть рассмотрены на основе анализа как физических, так и механических закономерностей зарождения и роста усталостных трещин в поликристаллах.

Таким образом, основная задача настоящей работы заключается в рассмотрении связи между физическими и механическими особенностями развития усталостных трещин в поликристаллах с целью обоснования критериев направления распространения трещины на I и II стадиях.

## **1. Механизмы и направления развития усталостной трещины на I и II стадиях.**

### **1.1. Механизмы развития усталостной трещины на I и II стадиях.**

Усталостное повреждение, как известно, обусловлено реверсивным пластическим деформированием материала. Поэтому для понимания закономерностей развития трещины на I и II стадиях кратко рассмотрим особенности пластического деформирования поликристаллического материала при циклическом нагружении, а также механизмы образования усталостных повреждений. Во внутренних (удаленных от поверхности) и поверхностных (локализованных около поверхности) зернах материала формирование полос скольжения происходит по-разному. В поверхностных зернах упрочнение материала в первичной системе полос скольжения практически не происходит, так как дислокации могут “выходить” на свободную поверхность, образуя тем самым экструзии и интрузии [3, 8]. Поэтому в таких зернах не образуется вторичная (поперечная) система скольжения. Экструзии и интрузии, возникающие в результате выхода дислокаций на поверхность, могут являться зародышами усталостных трещин.

Во внутренних зернах, как правило, образуется взаимно поперечная система полос скольжения. Вторичная система полос скольжения начинает формироваться после того как в первичной системе произойдет упрочнение, и дальнейшее деформирование материала по первичной системе становится более затруднительным, чем по вторичной [9, 10].

Рассмотрим возможные механизмы зарождения и роста микротрещин при наличии только первичной системы полос скольжения и при взаимно поперечной системе полос скольжения.

В поверхностных зернах поликристалла, т.е. только при первичной системе полос скольжения, микротрещины могут зарождаться в полосах скольжения по схеме встречных скоплений дислокаций [11]. Например, зарождение микротрещин может происходить по механизму встречных скоплений, предложенному Фудзитой, или по аннигиляционному механизму [11]. Объединение таких микротрещин, концентрация которых повышается с увеличением количества циклов нагружения, приводит к формированию и развитию макротрещины в поверхностных зернах. Таким образом, рост

макротрещины происходит посредством среза или разрыва перемычек между самими микротрещинами и между микротрещинами и макротрещиной.

Во внутренних зернах поликристалла микротрещины могут образовываться как в полосах скольжения, так и по различным дислокационным механизмам, которые “работают” при наличии пересекающихся линий и полос скольжения. Развитие микротрещин, зародившихся в полосах скольжения, происходит аналогично их росту в поверхностных зернах.

Наиболее изученным дислокационным механизмом роста микро- и макротрещин является механизм, реализуемый при активации, по крайней мере, двух систем скольжения. Поэтому он может реализовываться только во внутренних зернах. Назовем такой механизм LS-механизмом, впервые он был предложен в работе [12]. Его суть заключается в том, что вследствие выхода дислокаций на берега трещины последняя пластически притупляется, что увеличивает площадь ее поверхности. В полупереходе сжатия новая поверхность, образовавшаяся при притуплении трещины, не залечивается из-за несоответствия между сдвиговыми деформациями при растяжении и сжатии, и в результате трещина подрастает на величину  $\sim \delta/2$ , где  $\delta$  – ее притупление. Процессы сдвига вблизи вершины трещины по двум плоскостям скольжения могут быть детально представлены, например, в виде схем (рис. 2) [13].



Рис. 2. Процессы сдвига в вершине усталостной трещины при активации двух систем скольжения [13].

При LS-механизме трещина растет вдоль биссектрисы угла, образованного линиями скольжения, исходящими из вершины трещины, что при циклическом нагружении растяжением–сжатием (по моде I) соответствует развитию трещины перпендикулярно к максимальным нормальным деформациям. Рост усталостной макротрещины по LS-механизму также может происходить за счет притупления ее вершины. Такой механизм роста рассматривался в качестве основного в работе [14]. Предложены различные модификации LS-механизма, среди которых следует отметить модель, которая позволяет объяснить сложный профиль усталостной трещины в пластичных материалах [15, 16]. Эта модель включает разрушение сдвигом на начальном этапе полуперехода растяжения и дальнейшее пластическое притупление трещины при увеличении растягивающей нагрузки.

Заметим, что при развитии трещины по LS-механизму скорость ее роста  $dL/dN$  пропорциональна раскрытию  $\delta$ . Это соотношение было подтверждено для ряда материалов на втором участке кинетической диаграммы роста усталостной трещины при сопоставлении скорости роста трещины с шириной бороздок усталости, пропорциональной  $\delta$ , например [8, 14, 15, 16]. Как правило, это материалы с ГЦК-решеткой, в том числе аустенитные стали. Вместе с тем необходимо учитывать, что рост макротрещин по LS-механизму не является универсальным.

Действительно, из соотношения  $dL/dN \sim \delta$  следует, что  $dL/dN \sim K_I^2 / \sigma_Y E$  ( $K_I$  – коэффициент интенсивности напряжений при нагружении по моде I;  $\sigma_Y$  – предел текучести;  $E$  – модуль Юнга), а также, что скорость роста трещины более высокопрочного материала независимо от других характеристик будет ниже, чем малопрочного. Такой вывод противоречит многочисленным экспериментальным данным, например, представленным в [14, 17].

Рост усталостной макротрещины может происходить также в случае, когда около ее вершины в зоне реверсивного упругопластического деформирования зарождаются и развиваются микротрещины [18]. Их рост будет происходить по LS-механизму. По достижении некоторых критических размеров, при которых возможен вязкий разрыв перемычек, происходит объединение микротрещин с макротрещиной и тем самым ее продвижение. Согласно такому развитию трещин более высокопрочный материал не обязательно будет иметь более высокое сопротивление усталостному разрушению. Все в данном случае зависит от концентрации микротрещин, их размера, пластичности и прочности материала. Эти параметры и будут определять долговечность на стадии роста микротрещин, которая характеризует скорость роста макротрещины  $dL/dN$ , до момента разрыва перемычек между ними.

Таким образом, анализ пластического деформирования материала и механизмов образования усталостных повреждений в поверхностных и внутренних зернах позволяет сделать следующие выводы о закономерностях развития усталостных трещин.

При первичной системе полос скольжения, т.е. в поверхностных зернах, макротрещина образуется в полосе скольжения по механизму слияния микротрещин, зародившихся в ней. Направление роста макротрещины на I стадии соответствует направлению максимальных сдвиговых деформаций (или, как следует из теории пластичности, направлению максимальных напряжений). Следовательно, связь механизма роста трещины на этой стадии с критерием направления ее роста вполне очевидна. Более сложный случай имеет место при использовании критерия направления развития трещины на II стадии, где в общем случае макротрещина может развиваться по различным механизмам:

- по механизму слияния микротрещин, зародившихся в полосе скольжения;

- по LS-механизму;

- по механизму множественного зарождения микротрещин в зоне реверсивного упругопластического деформирования, их роста по LS-механизму и объединения с макротрещиной.

Кроме указанных механизмов усталостная трещина может развиваться также по другим, например по механизму циклического квазискола [16, 19]. Отметим еще раз, что по LS-механизму могут развиваться как макротрещина, так и микротрещины, зародившиеся у вершины макротрещины. Направление развития макротрещины на II стадии представляется очевидным только при ее росте по LS-механизму и циклическом нагружении по моде I.

С целью обоснования критерия направления развития макротрещины на II стадии при различных модах нагружения для рассмотренных механизмов ее роста и объяснения изменения траектории усталостной трещины при переходе от I стадии ко II рассмотрим особенности деформирования материала у вершины усталостной трещины.

**1.2. Направление развития макротрещины на I стадии и смена направления при переходе от I стадии ко II.** Далее под микротрещиной будем понимать трещину размером меньше размера зерна, макротрещину определим как трещину, размер которой равен или больше размера зерна. Под магистральным направлением развития трещины понимаем ее траекторию в масштабе, большем одного-двух зерен. Заметим, что кроме размера зерна существуют другие критерии, по которым дифференцируют усталостные трещины [20, 21].

На I стадии макротрещина образуется в полосе скольжения по механизму слияния микротрещин, зародившихся в полосе скольжения. Следовательно, направление роста макротрещины на этой стадии соответствует направлению максимальных сдвиговых деформаций или, как следует из теории пластичности, максимальных касательных напряжений.

Полагая, что дальнейшее развитие макротрещины также происходит по механизму зарождения и слияния микротрещин в полосах скольжения, покажем, что магистральное направление макротрещины на II стадии не может оставаться параллельным сдвиговым деформациям.

На рис. 3,а показана трещина, магистральное направление которой параллельно сдвиговым деформациям, а развитие происходит по механизму зарождения и слияния микротрещин в полосах скольжения. В поликристаллическом материале в общем случае зерна разориентированы, поэтому полосы скольжения также будут разориентированы. В результате профиль макротрещины представляет собой ломаную линию (рис. 3). Очевидно, что при нагружении по моде II (рис. 3,а) происходит контактирование берегов такой трещины, и, следовательно, концентрация деформации у ее вершины отсутствует. Это обстоятельство, которое, можно сказать, вызвано геометрическим фактором, объясняет, почему показанная на рис. 3,а макротрещина не может развиваться параллельно деформации сдвига на глубину больше одного-двух зерен. Отметим, что действительно на I стадии глубина макротрещины составляет именно эту величину.

В то же время зигзагообразная трещина, растущая по механизму зарождения и слияния микротрещин в полосах скольжения, может развиваться перпендикулярно к максимальным нормальным деформациям. Действительно, если такая трещина подвергается циклическому нагружению по моде I (рис. 3,б), происходит концентрация напряжений у вершины макротрещины, что в дальнейшем приводит к зарождению и объединению микротрещин в

полосах скольжения и, следовательно, росту макротрещины. Зигзагообразные трещины, магистральное направление развития которых происходит перпендикулярно к максимальным нормальным деформациям, наблюдали, например, для высокопрочной хромоникельмолибденовой стали в состоянии отпущенного мартенсита [22]. Таким образом, становится ясно, что макротрещина, растущая по механизму зарождения и слияния микротрещин в полосах скольжения, будет изменять свою траекторию на глубине одного-двух зерен и далее развиваться перпендикулярно к максимальным нормальным деформациям.

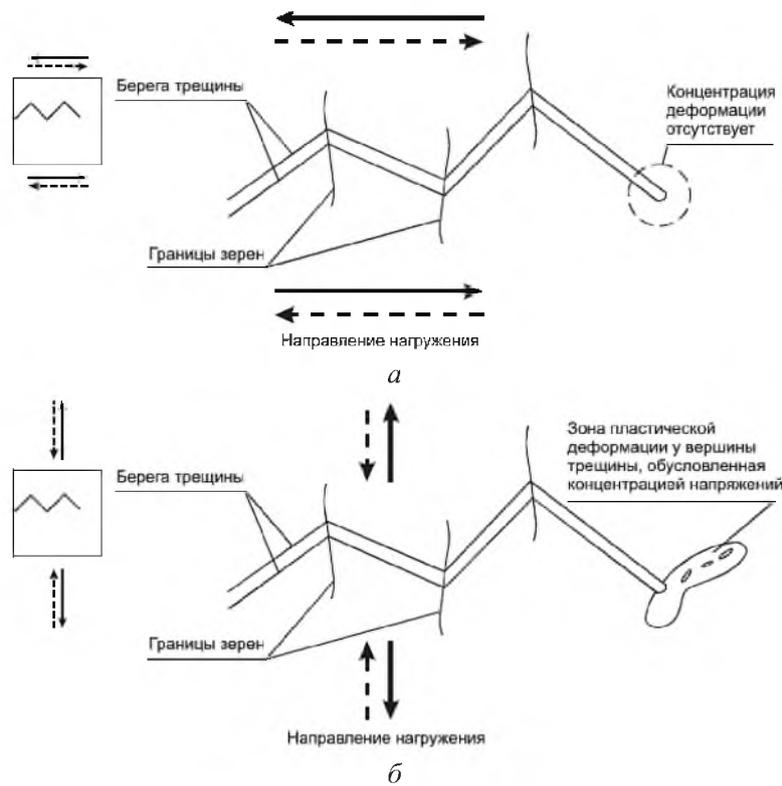


Рис. 3. Деформирование материала у вершины зигзагообразной трещины, растущей по механизму слияния микротрещин в полосе скольжения, при циклическом нагружении по моде II (а) и моде I (б).

Рассмотрим, как будет развиваться зигзагообразная трещина при смешанных модах нагружения. Очевидно, что при комбинации сдвиговых и нормальных деформаций наиболее быстро макротрещина будет развиваться в направлении, перпендикулярном к максимальным нормальным деформациям, в котором у ее вершины создается максимальная концентрация деформаций. По-видимому, только при очень больших нагрузках по I моде (нагрузках, раскрывающих трещину) возможно исключение из этого вывода. Действительно, при больших нагрузках раскрытие трещины может быть таким, что ее берега не будут контактировать друг с другом при сдвиге. В этом случае магистральное развитие макротрещины может проходить в

некоторой промежуточной области между направлением, которое перпендикулярно к максимальным нормальным деформациям, и направлением, совпадающим с максимальными сдвиговыми деформациями.

Таким образом, в большинстве случаев при механизме развития микротрещин в полосах скольжения магистральное направление развития макротрещины на II стадии будет проходить перпендикулярно к максимальным нормальным деформациям.

**1.3. LS-механизм и направление развития макротрещины на II стадии.** При реализации LS-механизма (рис. 2) магистральное направление развития трещины проходит вдоль биссектрисы угла, образованного линиями скольжения, которые исходят из вершины трещины, что при циклическом нагружении растяжением–сжатием (по моде I) соответствует развитию трещины перпендикулярно к максимальным нормальным деформациям.

Согласно критерию (1), и при смешанных модах нагружения развитие трещины на II стадии будет происходить перпендикулярно к максимальным нормальным деформациям, что подтверждается экспериментальными исследованиями [1–3].

Полагая, что рост трещины происходит по LS-механизму, попытаемся ответить на вопрос, почему критерий (1) “работает” при смешанных модах нагружения. Для этого исследуем распределение пластических деформаций у вершины трещины при различной ее ориентации относительно растягивающей нагрузки (или, что эквивалентно, при смешанной моде нагружения).

Для исследования распределения деформаций у вершины микротрещины и анализа ее развития в зависимости от ориентации были проведены расчеты по методу конечных элементов (МКЭ) на программном комплексе ANSYS в двухмерной постановке при условии плоской деформации. Схема расчета напряженно-деформированного состояния представлена на рис. 4. Угол ориентации трещины  $\alpha$  варьировался от 0 до 60°.

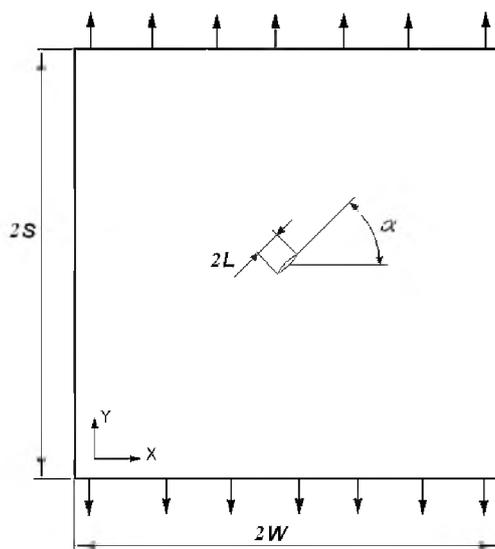


Рис. 4. Схема расчета напряженно-деформированного состояния у вершины трещины при различной ее ориентации относительно растягивающей нагрузки.

С целью исключения краевых эффектов и обеспечения однородной номинальной пластической деформации на удалении от трещины было принято соотношение  $L/W = 1/50$  ( $S = W$ ). Здесь размеры пластины:  $2S$  и  $2W$ , длина трещины  $2L$ . Для упрощения расчетов осуществлялось не циклическое, а монотонное нагружение пластины. Нагрузка задавалась кинематическими граничными условиями, при этом номинальная деформация  $\varepsilon_{YY}$  в пластине рассчитывалась по формуле  $\varepsilon_{YY} = U_Y/S$ , где  $U_Y$  – перемещение края пластины вдоль оси  $Y$ . Размер конечных элементов у вершины трещины был равен 0,0025 мм.

По результатам расчетов получены распределения эквивалентных и сдвиговых пластических деформаций у вершины трещины, которые в полярной системе координат представлены на рис. 5 для углов  $\alpha = 30, 45$  и  $60^\circ$ . Вычислены также векторные распределения главных (максимальной и минимальной) деформаций у вершины трещины для разных углов  $\alpha$ . В качестве примера на рис. 6 показаны направления действия главных пластических деформаций у вершины трещины при угле ее ориентации  $\alpha = 60^\circ$ .

Анализ результатов расчетов позволяет сделать следующие выводы. Как видно из рис. 5, зона равного уровня эквивалентной и сдвиговой деформации для любого угла  $\alpha$  по форме напоминает “бабочку”, причем биссектриса угла, образованного ее “крыльями”, перпендикулярна к оси  $Y$ , т.е. к направлению действия номинальных деформаций  $\varepsilon_{YY}$ . Векторное распределение главных деформаций у вершины трещины (рис. 6) показывает, что эта биссектриса перпендикулярна к направлению действия наибольшей (первой) главной деформации и ее ориентация не зависит от ориентации трещины в поле номинальных деформаций.

Учитывая, что рост трещины по LS-механизму происходит вдоль биссектрисы угла, образованного линиями скольжения, полученные расчетные результаты свидетельствуют, что рост трещины происходит перпендикулярно к наибольшей главной деформации.

Таким образом, выполненные расчетные исследования распределения пластических деформаций у вершины трещины позволяют установить связь между физическим механизмом роста трещины и критерием, сформулированным в терминах механики: дислокационный LS-механизм роста усталостной трещины приводит к критерию направления роста трещины в виде (1).

Выше не акцентировалось внимание на том, какая трещина (микро или макро) рассматривается, поскольку с механической точки зрения полученные результаты правомерны и в том и в другом случае.

**1.4. Направление развития макротрещины на II стадии при множественном зарождении микротрещин.** Попытаемся ответить на вопрос, почему при развитии усталостной макротрещины по механизму множественного зарождения микротрещин в зоне реверсивного упругопластического деформирования направление ее роста будет соответствовать критерию (1). На первый взгляд представляется, что при множественном зарождении микротрещин в разных местах пластической зоны перед вершиной макротрещины направление роста последней может быть произвольным. Рассмотрим траектории развития микротрещин при различном их расположении по отношению к макротрещине, предполагая, что их рост происходит по LS-механизму.

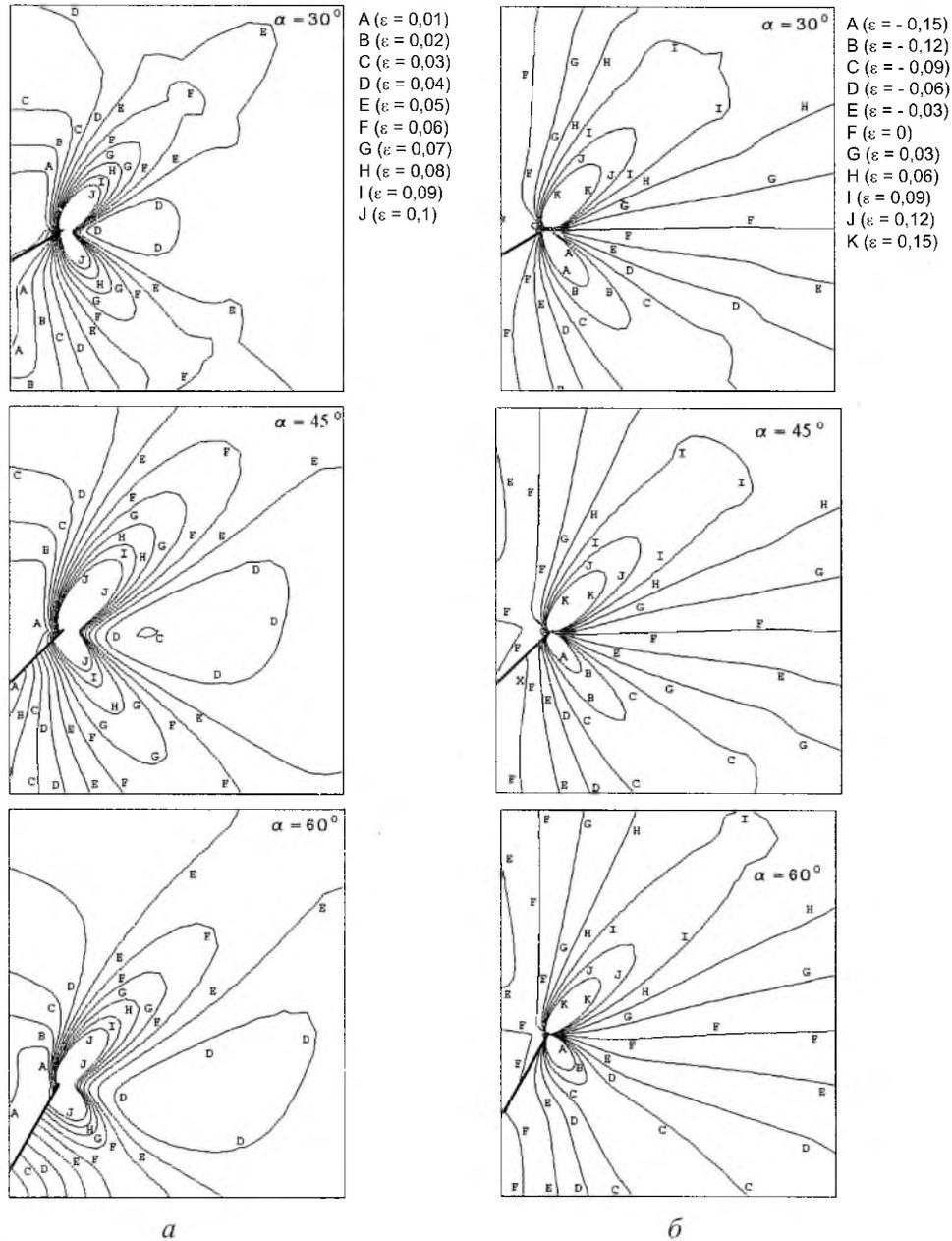


Рис. 5. Распределение эквивалентных (а) и сдвиговых (б) пластических деформаций у вершины трещины при углах ориентации  $\alpha = 30, 45$  и  $60^\circ$  (изолинии соответствуют разным уровням пластической деформации).

Следует отметить, что согласно вышепредставленным результатам, растущая по LS-механизму микротрещина с любой ориентацией будет развиваться таким образом, чтобы ее путь был ориентирован перпендикулярно к направлению наибольшей главной пластической деформации  $\varepsilon_1^P$ . (Для простоты изложения ниже вместо  $\Delta\varepsilon_{ij}^P$  будем использовать  $\varepsilon_{ij}^P$ .)

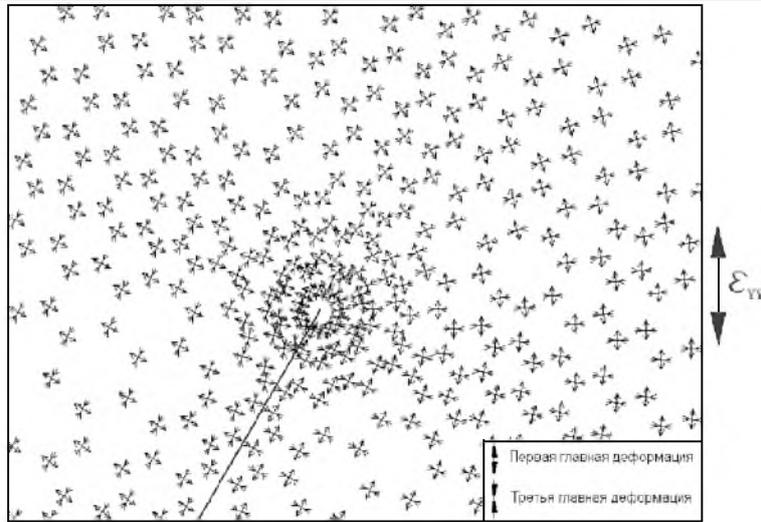


Рис. 6. Распределение направлений действия главных пластических деформаций при растяжении пластины с трещиной, ориентированной под углом  $\alpha = 60^\circ$  к направлению растяжения. (Размер стрелки не зависит от величины деформации.)

На рис. 7 показаны схемы развития микротрещин при различной их ориентации и расположении по отношению к макротрещине. Заметим, что вдоль радиуса-вектора при любом угле  $\theta$  ориентация главных деформаций практически не изменяется (по крайней мере, в области развитой пластической деформации), так как не изменяется соотношение компонент деформаций [23]. Одинаковая ориентация главных деформаций вдоль любого радиуса-вектора хорошо видна на рис. 6. Предположим, что деформация  $\varepsilon_{\theta\theta}^P = \max$  при  $\theta = \theta^*$  (рис. 7,а), т.е. наибольшая главная деформация  $\varepsilon_1^P = \varepsilon_{\theta\theta}^P$ . В этом случае рост расположенных вдоль направления  $\theta = \theta^*$  микротрещин по LS-механизму согласно критерию (1) будет происходить также вдоль этого направления. Таким образом, микротрещины, расположенные вдоль направления  $\theta = \theta^*$ , будут развиваться вдоль него по прямолинейным траекториям навстречу друг другу и объединяться между собой и макротрещиной.

Рассмотрим ситуацию, когда микротрещины локализованы вдоль некоторого другого радиуса-вектора  $\theta = \theta^{**}$  (рис. 7,б). При этом направление действия наибольших главных деформаций  $\varepsilon_1^P$  не совпадает с направлением действия  $\varepsilon_{\theta\theta}^P|_{\theta=\theta^{**}}$ . Такие микротрещины, растущие по LS-механизму, будут развиваться по траекториям, которые не совпадают с направлением радиуса-вектора под углом  $\theta^{**}$  (рис. 7,б). Дальнейшее развитие микротрещин будет происходить по некоторым криволинейным траекториям, так как ориентация главных деформаций изменяется по мере их развития. Поэтому объединение таких микротрещин маловероятно как между собой, так и с макротрещиной, поскольку длина их пути до макротрещины существенно больше, чем для микротрещин, расположенных вдоль радиуса-вектора

$\theta = \theta^*$ . Следовательно, эти микротрещины не приводят к развитию макротрещины, но сопутствуют ее росту. Интересно отметить, что сопутствующие микротрещины характерны для высокопрочных сталей. Это подтверждается фрактографическими исследованиями [24].

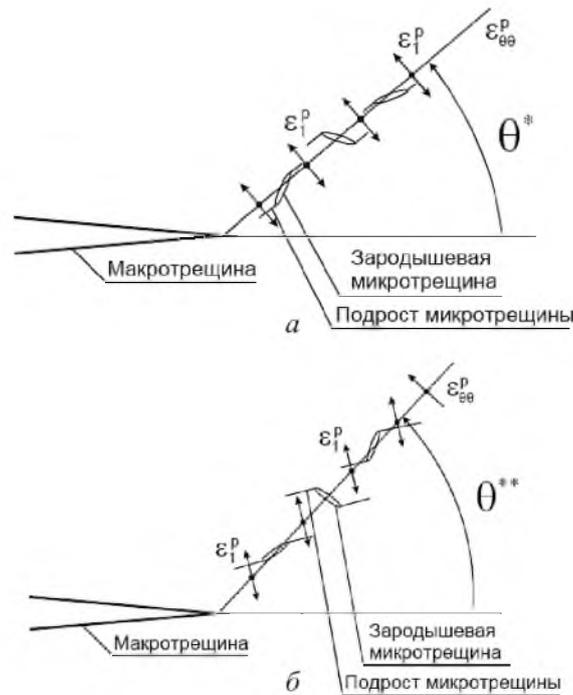


Рис. 7. Схема развития микротрещин при различном их расположении по отношению к макротрещине: а –  $\epsilon_1^p = \epsilon_{\theta\theta}^p$  при  $\theta = \theta^*$ ; б –  $\epsilon_1^p \neq \epsilon_{\theta\theta}^p$  при  $\theta = \theta^{**}$ .

**2. Скорость роста усталостной трещины на II стадии в условиях смешанного нагружения и объемного напряженного состояния при множественном зарождении микротрещин.** При развитии усталостной трещины по механизму множественного зарождения и развития микротрещин в зоне реверсивного упругопластического деформирования расчет скорости ее роста на II стадии при смешанном нагружении может быть выполнен следующим образом.

Примем, что элементарный подрут макротрещины происходит в случае, когда микротрещины, расположенные вдоль радиуса-вектора под углом  $\theta^*$  (рис. 7,а), дорастают до некоторого критического размера  $l_c$ , после чего они объединяются вследствие вязкого разрушения перемычек между ними. Рост микротрещин, согласно работам [3, 18], описывается уравнением

$$\frac{dl}{dN} = B(\Delta\epsilon^H)^{m_p} l, \quad (2)$$

где  $\Delta\epsilon^H$  – размах неупругой деформации;  $l$  – длина микротрещины;  $B$  и  $m_p$  – константы материала.

Согласно [18] имеем

$$\Delta\varepsilon^H = \Delta\varepsilon^P + A_e(\Delta\varepsilon^e)^{m_e}, \quad (3)$$

где  $\Delta\varepsilon^e$  – размах упругой деформации;  $A_e$  и  $m_e$  – константы материала. Уравнение (3) учитывает, что вклад пластической и упругой деформации в усталостное повреждение разный.

При интегрировании уравнения (2) с учетом (3) получим

$$\ln\left(\frac{l_c}{l_0}\right) = B(\Delta\varepsilon^P + A_e(\Delta\varepsilon^e)^{m_e})^{m_p} N_{prop}, \quad (4)$$

где  $l_0$  и  $l_c$  – длина зародышевой и критической микротрещин соответственно;  $N_{prop}$  – количество циклов нагружения, необходимое для роста микротрещины до критической длины.

Учитывая, что при малоциклового усталости микротрещина зарождается в первых циклах нагружения, можно принять  $N_{prop} \approx N_f$ . Обобщая уравнение (4) на случай объемного напряженного состояния (ОНС), получаем

$$B(\Delta\varepsilon_{eq}^P + A_e(\Delta\varepsilon_{eq}^e)^{m_e})^{m_p} N_f = C, \quad (5)$$

где  $C = \frac{l}{B} \ln\left(\frac{l_c}{l_0}\right)$  – константа материала. Параметр  $l_c$  зависит от концентрации зародышевых микротрещин, а также от прочностных и пластических свойств материала.

На основе уравнения (5) скорость роста трещины на II стадии может быть рассчитана, если развитие макротрещины рассматривать как дискретный процесс, где элементарный подрост трещины происходит на величину  $\Delta L = d_g$  ( $d_g$  – диаметр зерна) за количество циклов  $N_f$ , рассчитываемое из этого же уравнения.

Заметим, уравнение (5) учитывает, что при одном и том же размахе полной деформации соотношение размахов пластической  $\Delta\varepsilon_{eq}^P$  и упругой  $\Delta\varepsilon_{eq}^e$  деформаций может быть различным. Такая особенность характерна при деформировании материала в условиях ОНС. Покажем это на простом примере.

Иследуем поверхность текучести идеально упругопластического материала (рис. 8). В этом случае поверхность текучести на девиаторной плоскости при деформировании материала не трансформируется. Рассмотрим циклическое нагружение с разным уровнем максимальной нагрузки. На рис. 8 показаны различные траектории деформирования: 0–1–2–5 соответствует меньшей максимальной нагрузке (0–1–2 – нагрузка, 2–5 – разгрузка), 0–1–2–3–4 – большей максимальной нагрузке (0–1–2–3 – нагрузка, 3–4 – разгрузка).

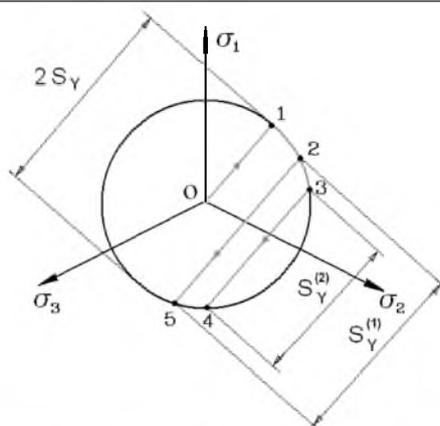


Рис. 8. Девиаторная плоскость и различные траектории деформирования материала в условиях ОНС.

После перехода из упругого состояния в пластическое изменяется соотношение компонент напряжений (они не изменяются только для несжимаемого материала). При упругой разгрузке вектор приращения компонент напряжений коллинеарен вектору напряжений при нагрузке в области упругости. Поэтому линия  $0-1$  параллельна линиям  $2-5$  и  $3-4$  (рис. 8). Из рис. 8 видно, что при нагружении с большей максимальной нагрузкой (большей асимметрией) циклический предел текучести  $S_Y$  меньше. Следовательно, при одном и том же размахе полной деформации размах пластической деформации будет больше в случае большей асимметрии нагружения.

**3. Усталостные микротрещины и разрушение сколом.** В заключение попытаемся ответить на вопрос, который также требует совместного анализа физических и механических особенностей зарождения и распространения микротрещин. Его можно сформулировать следующим образом: могут ли усталостные микротрещины инициировать разрушение сколом на макроуровне.

Действительно, усталостная микротрещина, как обсуждалось выше, при циклическом нагружении может расти по механизму множественного зарождения микротрещин в зоне реверсивного упругопластического деформирования и их объединения с макротрещиной. С другой стороны, хрупкое разрушение сколом у вершины стационарной трещины, как известно, инициируется по механизму встречного разрушения, когда вблизи вершины зарождается новая микротрещина скола и объединяется с макротрещиной [18]. В этом случае зародившаяся микротрещина как бы встраивается в ранее созданное поле высоких растягивающих напряжений. Такая микротрещина нагружается “мгновенно” внешней нагрузкой (для микротрещины это поле растягивающих напряжений у вершины макротрещины). Тогда процесс релаксации локальных напряжений у вершины микротрещины не успевает произойти (формально у вершины такой микротрещины  $\sigma_Y \rightarrow \infty$ ), и напряжения у ее вершины могут достичь теоретической прочности при отрыве  $\sigma_{th}$ .

Локальный критерий хрупкого разрушения можно записать в виде [25, 26]

$$\sigma_{nuc} \geq \sigma_d; \quad (6a)$$

$$\sigma_1 \geq S_c, \quad (6б)$$

где  $\sigma_{nuc} = \sigma_1 + m_{Te}\sigma_{eff}$ ;  $\sigma_{eff} = \sigma_{eq} - \sigma_Y$ ;  $m_{Te}$  – параметр, зависящий от температуры и пластической деформации;  $\sigma_d$  – константа, определяющая сопротивление материала зарождению микротрещины скола;  $S_c$  – критическое напряжение хрупкого разрушения, определяющее сопротивление материала старту и распространению микротрещины через различные барьеры: микронапряжения; границы деформационной субструктуры и границы зерен. Неравенство (6a) соответствует условию зарождения микротрещины, выражение (6б) – условию ее распространения.

Для сталей средней и высокой прочности, в частности для корпусных реакторных сталей, условием, контролирующим хрупкое разрушение образца с трещиной при  $K_I = K_{Ic}$ , является условие зарождения микротрещины (6a) [18, 25]. Иными словами, у вершины макротрещины при  $K_I < K_{Ic}$  условие (6б) уже выполнено и только при  $K_I = K_{Ic}$  выполняется условие (6a) – зарождение микротрещины скола.

Очевидно, что при циклическом нагружении существует диапазон величин  $K_{I\max}$ , меньших  $K_{Ic}$ , когда  $\sigma_1$  у вершины трещины выше  $S_c$ . Учитывая, что усталостные микротрещины зарождаются в первых циклах нагружения, возникает вопрос: почему хрупкое разрушение не инициируется от усталостной макротрещины при  $K_{I\max}$ , которые значительно меньше  $K_{Ic}$ . Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо рассмотреть, какие микротрещины могут инициировать хрупкое разрушение.

Условие (6a) есть условие зарождения микронесплошности. Будет или нет эта микронесплошность распространяться по механизму скола зависит от выполнения некоторых дополнительных условий, которые могут быть сформулированы следующим образом.

Во-первых, для зародившейся микротрещины отношение длины к радиусу вершины микротрещины ( $l_0/a_0$ ) должно быть таким, чтобы выполнялось условие  $\sigma_{\max} = \sigma_{th}$ , т.е. условие Гриффитса. Отметим, что минимальная длина зародышевой трещины  $l_{Gr}$  определяется из условия Гриффитса, когда  $a_0$  принимается равным параметру решетки.

Кроме того, зародышевая микротрещина должна быть устойчива к эмиссии дислокаций из ее вершины. Было предложено несколько условий стабильности микротрещины к эмиссии дислокаций. Например, условие Келли–Тайсона–Коттрелла [27] можно представить в виде

$$\tau_{\max}/\sigma_{\max} < \tau_{th}/\sigma_{th}, \quad (7)$$

где  $\tau_{\max}$  – максимальное сдвиговое напряжение у вершины трещины;  $\tau_{th}$  – теоретическая прочность при сдвиге.

Из (7) следует, что при  $\sigma_{\max} = \sigma_{th}$  выполняется условие  $\tau_{\max} < \tau_{th}$ , и, значит, эмиссия дислокаций не происходит до разрыва атомной связи в вершине трещины.

Для  $\alpha$ -железа значение  $\tau_{th}/\sigma_{th}$  изменяется от 0,22 до 0,28 [28]. Для микротрещины, которая зародилась в плоскости спайности и ориентирована перпендикулярно к нормальным напряжениям, отношение  $\tau_{sl}/\sigma_{cl} \approx 0,32$  согласно решению Ирвина ( $\tau_{sl}$  и  $\sigma_{cl}$  – сдвиговое и растягивающее напряжения у вершины трещины в плоскостях сдвига и скола соответственно). Этот результат показывает, что  $\alpha$ -железо в определенной степени необходимо рассматривать как “пограничный” материал, для которого приведенные оценки слишком грубы, чтобы определить, будет ли микротрещина скола расти хрупко или вязко [29, 30]. В то же время условие (7) позволяет выделить механизмы зарождения микротрещин, которые приводят к зарождению микротрещин, нестабильных к эмиссии дислокаций. К таким механизмам, например, относится механизм зарождения микротрещины в плоскости скольжения. Если такая микротрещина ориентирована параллельно сдвиговому напряжению, то  $\tau_{sl}/\sigma_{cl} = 1,03$  [31] и, следовательно,  $\tau_{sl}/\sigma_{cl} \gg \gg \tau_{th}/\sigma_{th}$ . Отсюда вытекает, что усталостные микротрещины, которые зарождаются в полосах скольжения, заведомо не могут распространяться по механизму скола.

Таким образом, приведенные оценки показывают, что устойчивость микротрещин к эмиссии дислокаций из вершины может быть обеспечена, если кроме условия (7) выполняется некоторое дополнительное требование. Это требование может быть сформулировано в следующей форме: скорость роста зародышевой микротрещины до длины, когда удовлетворяется условие Гриффитса, должна быть существенно больше скорости движения дислокаций, т.е. скорости пластической деформации. Отметим, что некоторые теоретические [32] и экспериментальные [33] результаты подтверждают стабильность динамически растущих микротрещин к эмиссии дислокаций из их вершин.

Предложенное условие, очевидно, выполняется, если микротрещина зарождается около прочного барьера. В этом случае образуется мощное дислокационное скопление, которое при разрушении барьера практически мгновенно “сваливается” в полость образующейся микротрещины, и таким образом она растет очень быстро. Если для зародившейся микротрещины напряжение, действующее на нее, и отношение  $l_0/a_0$  таковы, что выполняется условие  $\sigma_{max} = \sigma_{th}$ , то динамический рост микротрещины продолжается при  $l > l_0$  под действием “внешнего” поля напряжений.

Несколько следствий вытекает из сформулированного условия. В частности, для  $\alpha$ -железа “медленные” механизмы зарождения микротрещин (такие, как механизм Коттрелла), когда дислокации из дислокационного скопления двигаются одна за другой (по очереди) в полость образующейся микротрещины, скорее всего, не могут привести к разрушению сколом. Ясно также, что микротрещины, стабильные к эмиссии дислокаций, не могут зародиться у слабых барьеров. Действительно, у слабого барьера микротрещина образуется при небольшом дислокационном скоплении, и ее длина меньше длины  $l_{Gr}$ . В результате условие  $\sigma_{max} = \sigma_{th}$  не выполняется, и при дальнейшем деформировании микротрещина притушивается и превращается в пору. Это объясняет, в частности, почему такие слабые барьеры, как MnS и  $Al_2O_3$ , не являются инициаторами хрупкого разрушения сталей.

Таким образом, чтобы микротрещина могла привести к хрупкому разрушению, необходимо выполнение трех условий:

1) микротрещина должна быть ориентирована таким образом, чтобы величина  $\tau_{sl}/\sigma_{cl}$  была минимальной (условие (7));

2) относительная скорость роста микротрещины  $\frac{dl}{ld\tau}$  должна быть больше скорости пластической деформации;

3) длина зародышевой микротрещины  $l_0$  должна удовлетворять условию Гриффитса.

Отметим, что существует исключение из представленных требований, касающееся необязательности выполнения второго условия – условия быстрого роста микротрещины. Это условие фактически обеспечивает отсутствие эмиссии дислокаций из вершины растущей трещины. В принципе, если эмиссия дислокаций из вершины трещины каким-либо образом исключена при ее “медленном” образовании и дальнейшем нагружении вплоть до выполнения условия Гриффитса, то такая трещина может служить источником хрупкого разрушения. Данная ситуация может реализовываться, когда пластическое деформирование происходит при сжатии. В этом случае в процессе деформирования трещина растет посредством “закачивания” в полость дислокаций, но при этом на значительной части ее длины берега контактируют друг с другом под действием сжимающих напряжений (рис. 9). Таким образом, пластическое деформирование сжатием может приводить к зарождению достаточно протяженных трещин, вершины которых не притупляются, поскольку при сжатии вершина трещины не является концентратором для нормальных к ней напряжений (рис. 9). При последующем растяжении в низкотемпературной области такие трещины могут инициировать хрупкое разрушение, так как они удовлетворяют условию Гриффитса раньше, чем произойдет притупление их вершин. Хрупкое разрушение, происходящее по такому сценарию, приводит к существенному снижению критического напряжения хрупкого разрушения [34].

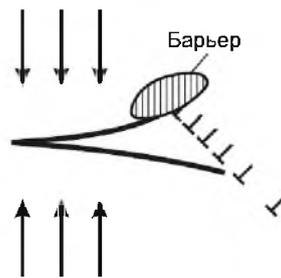


Рис. 9. Рост трещины при пластическом деформировании сжатием.

Теперь вернемся к усталостным микротрещинам. При  $K_{I\max} < K_{Ic}$  зарождаются микротрещины, для которых не выполняется какое-либо из трех сформулированных условий. Для микротрещин, зародившихся в полосах скольжения, не выполняется условие (7). Зарождение микротрещин перед вершиной макротрещины в зоне реверсивного упругопластического деформирования, скорее всего, происходит по “медленным” механизмам или

около слабых включений, и таким образом, не выполняются второе или третье условия. Растущие микротрещины также не могут привести к хрупкому разрушению, так как их развитие, по сути, есть пластическое деформирование в вершинах. Следовательно, локальные напряжения у вершин таких микротрещин не могут достигать  $\sigma_{th}$ .

Таким образом, механизмы зарождения и роста усталостных микротрещин не обеспечивают выполнения сформулированных условий, поэтому в большинстве случаев микротрещины не являются источниками разрушения сколом на макроуровне.

## Выводы

1. Обоснованы критерии направления распространения усталостной трещины на I и II стадиях на основе анализа физических и механических особенностей развития усталостных трещин в поликристаллах.

Распространение усталостной трещины параллельно сдвиговым деформациям на I стадии обусловлено образованием и развитием макротрещины по механизму слияния микротрещин, зародившихся в полосе скольжения.

Рассмотрены основные механизмы развития макротрещины на II стадии: механизм объединения микротрещин, зародившихся в полосе скольжения; дислокационный LS-механизм и механизм множественного зарождения и роста микротрещин в зоне реверсивного упругопластического деформирования.

Показано, что для всех указанных механизмов развитие усталостной трещины на II стадии происходит перпендикулярно к максимальным нормальным деформациям, что обусловлено особенностями формирования напряженно-деформированного состояния у вершины усталостной трещины.

2. Представлено уравнение для расчета скорости роста усталостной трещины на II стадии в условиях смешанного нагружения и объемного напряженного состояния при множественном зарождении микротрещин. Это уравнение учитывает, что в условиях объемного напряженного состояния при одной и той же циклической нагрузке соотношение размахов пластической и упругой деформации зависит от асимметрии нагружения.

3. Сформулированы условия, при выполнении которых микротрещины могут быть инициаторами хрупкого разрушения. Показано, что механизмы зарождения и роста усталостных микротрещин не обеспечивают выполнения сформулированных условий и поэтому в большинстве случаев микротрещины не являются источниками разрушения сколом на макроуровне.

## Резюме

Розглянуто зв'язок між механізмами росту втомної тріщини та напрямком її розвитку на I і II стадіях. Обґрунтовано критерії напрямку розповсюдження втомної тріщини на цих стадіях на основі аналізу фізичних і механічних властивостей розвитку втомних тріщин у полікристалах. Обговорюються умови, за виконання яких мікротріщини можуть бути ініціаторами крихкого руйнування.

1. *Forsyth P. J. E.* A two stage progress of fatigue crack: Proc. Symp. on Crack Propagation. – Granfield, 1971. – P. 76 – 87.
2. *Bold P. E., Brown M. W., and Allen R. J.* A review of fatigue crack growth in steels under mixed mode I and II loading // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1992. – **15**, No. 10. – P. 965 – 977.
3. *Miller K. J.* Creep and fracture // Mechanical and Thermal Behaviour of Metallic Material. – Amsterdam; New York; Oxford: North-Holland Publishing Company, 1982. – P. 6 – 118.
4. *Mughrabi H.* Cyclic hardening and saturation behavior of copper single crystals // Mater. Sci. Eng. – 1978. – **33**. – P. 207 – 223.
5. *Mughrabi H. and Wang R.* Mechanisms and microstructures // Determination of Polycrystals: Proc. 2nd Riso Int. Symp. on Metallurgy and Material Science / Eds. N. Hansen, A. Horsewell, T. Leffert, and H. Lilholt (Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark), 1981. – P. 87 – 99.
6. *Brown M. W.* Interface of shot, long, and nonpropagation cracks // The Behaviour of Short Fatigue Cracks. – London: MEP Inst. Mech. Eng., 1986. – Vol. 1. – P. 423 – 439.
7. *Miller K. J.* The two thresholds of fatigue behaviour // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1993. – **16**. – P. 931 – 939.
8. *Коцаньда С.* Усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 451 с.
9. *Seeger A.* Dislocations and Mechanical Properties of Crystals. – New York: Wiley, 1957. – 243 p.
10. *Виртман Дж., Виртман Дж. Р.* Механические свойства, несущественно зависящие от температуры // Физическое металловедение / Под ред. Р. У. Кана и П. Хаадена. – М.: Металлургия, 1987. – Т. 3. – С. 112 – 153.
11. *Владимиров В. И.* Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
12. *Laird C. and Smith G. C.* Crack propagation in high stress fatigue // Phil. Mag. – 1962. – **7**. – P. 847 – 857.
13. *Нейман П.* Усталость // Физическое металловедение / Под ред. Р. У. Кана и П. Хаадена. – М.: Металлургия, 1987. – P. 392 – 431.
14. *Tomkins B.* Micromechanisms of fatigue crack growth at high stress // Metal. Sci. – 1980. – **14**. – P. 408 – 417.
15. *Красовский А. Я.* Механизмы распространения трещин усталости в металлах // Пробл. прочности. – 1980. – № 10. – С. 65 – 72.
16. *Красовский А. Я.* Хрупкость металлов при низких температурах. – Киев: Наук. думка, 1980. – 340 с.
17. *Коцаньда С.* Усталостное растрескивание металлов. – М.: Металлургия, 1990.
18. *Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А.* Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.
19. *Иванова В. С., Шанявский А. А.* Количественная фрактография. Усталостное разрушение. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 400 с.

20. *Ostash O. P., Panasyuk V. V., and Kostyk E. M.* A phenomenological model of fatigue macrocrack initiation near stress concentrators // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1999. – **22**, No. 2. – P. 161 – 172.
21. *Ostash O. P. and Panasyuk V. V.* Fatigue process zone at notches // *Int. J. Fatigue.* – 2001. – **23**, No. 7. – P. 627 – 636.
22. *Ronay M.* Fatigue of high-strength materials // *Fracture* / Ed. H. Liebowitz. – New York; London: Academic Press, 1971. – Vol. 3. – P. 473 – 527.
23. *Rice J. R. and Rosengren G. F.* Plane strain deformation near a crack tip in hardening materials // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1968. – **16**, No. 1. – P. 1 – 12.
24. *Алексейчук И. Б., Карзов Г. П., Никонов Ю. А., Рыбин В. В.* Механизм роста усталостных трещин во вторично твердеющей стали // *Физ.-хим. механика материалов.* – 1984. – № 3. – С. 65 – 69.
25. *Марголин Б. З., Швецова В. А.* Критерий хрупкого разрушения: структурно-механический подход // *Пробл. прочности.* – 1992. – № 2. – С. 3 – 16.
26. *Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., and Kostylev V. I.* Application of a new cleavage fracture criterion for fracture toughness prediction for RPV steels // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 2006. – **29**. – P. 697 – 713.
27. *Kelly A., Tyson W. R., and Cottrell A. H.* Ductile and brittle crystals // *Phil. Mag.* – 1967. – **15** (135). – P. 567 – 586.
28. *Macmillan N. H.* The ideal strength of solids // *Atomistic of Fracture* / Eds. R. M. Latanision and J. R. Pickens. – New York: Plenum Press, 1983. – P. 95 – 164.
29. *Thomson R.* Physics of fracture // *Atomistic of Fracture* / Eds. R. M. Latanision and J. R. Pickens. – New York: Plenum Press, 1983. – P. 167 – 204.
30. *Knott J. F.* Mechanics of fracture // *Atomistic of Fracture* / Eds. R. M. Latanision and J. R. Pickens. – New York: Plenum Press, 1983. – P. 209 – 235.
31. *Margolin B. Z., Shvetsova V. A., and Karzov G. P.* Brittle fracture of nuclear pressure vessel steels. Pt I. Local criterion for cleavage fracture // *Int. J. Press. Vess. Piping.* – 1997. – **72**. – P. 73 – 87.
32. *Dienes G. J. and Paskin A.* Computer modeling of cracks // *Atomistic of Fracture* / Eds. R. M. Latanision and J. R. Pickens. – New York: Plenum Press, 1983. – P. 671 – 704.
33. *Bament A. L., Hoagland R. C., and Smidt F. A.* Fracture mechanisms and radiation effects // *Fracture* / Ed. H. Liebowitz. – New York; London: Academic Press, 1971. – Vol. 3. – P. 579 – 634.
34. *Марголин Б. З., Швецова В. А., Варовин А. Я.* Предварительное сжатие материала как фактор смены механизма хрупкого разрушения ОЦК-металлов // *Пробл. прочности.* – 1996. – № 4. – С. 5 – 18.

Поступила 08. 10. 2007