

УДК 620.178.6

## О МЕХАНИЗМЕ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В ПОЛЕ ВНЕШНИХ СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

А. П. Шабанов

Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049 Новосибирск  
E-mail: surovin@stu.ru

Рассматривается образец с трещиной в виде тонкого протяженного дефекта с параллельными берегами, вершина которого имеет радиус конечной величины. При нагружении такого образца внешней пульсирующей сжимающей нагрузкой благодаря наличию пластических деформаций в вершине дефекта напряжения в зонах образца, примыкающих к носику трещины, изменяются по знакопеременному циклу. Это может быть причиной развития усталостной трещины. Результаты численного моделирования и данные экспериментов подтверждают возможность развития усталостной трещины, находящейся в поле действия внешних сжимающих напряжений.

Ключевые слова: усталостная трещина, сжатие, пластическая зона.

**1. Постановка задачи.** В классической механике разрушения предполагается, что сжимающие напряжения не влияют на характер разрушения и скорость роста усталостной трещины [1–3]. Считается, что если в цикле нагружения имеются сжимающие напряжения ( $\sigma_{\min} < 0$ ), то на обратном ходе (когда внешняя нагрузка  $\sigma_0$  стремится к значению  $\sigma_{\min}$ ) берега смыкаются и трещина закрывается по всей длине. В этом случае при анализе процесса разрушения обычно рассматривается пульсирующий цикл нагружения от напряжений  $\sigma_0 = 0$  до растягивающих напряжений  $\sigma_0 = \sigma_{\max}$ . Значит, какой бы ни была величина  $\sigma_0 = \sigma_{\min}$ , при постоянном значении  $\sigma_{\max}$  процессы накопления усталостных повреждений считаются неизменными. Однако результаты экспериментов [4, 5] по исследованию усталостной трещины, находящейся в поле сжимающих напряжений, противоречили классическим представлениям механики разрушения.

В частности, изучалось влияние уровня сжимающих напряжений на рост усталостной трещины [4]. В экспериментах на стальных образцах нагружение производилось таким образом, чтобы максимальные напряжения цикла  $\sigma_{\max}$  имели положительный знак и для всей партии образцов были одинаковыми. Минимальные напряжения цикла ( $\sigma_{\min}$ ) — сжимающие. Для каждого образца партии устанавливалась своя величина минимальных напряжений. Эксперименты показали, что скорость роста трещины, во-первых, не зависит от ее длины, а во-вторых, существенно зависит от величины сжимающих напряжений: чем больше абсолютное значение  $\sigma_{\min}$ , тем быстрее происходит процесс развития трещины.

Эти результаты отличаются от классических представлений, согласно которым скорость роста трещины повышается с увеличением ее длины [1, 2], а значение сжимающих напряжений цикла не влияет на развитие трещины, поскольку при сжатии она закрывается [1].

Экспериментальные исследования развития усталостных трещин в стальных образцах, помещенных в поле переменных сжимающих напряжений, позволили сделать следующие выводы [5].

1. В образце, имеющем инициирующие разрезы, трещина зарождается в тех точках разреза, где возникают максимальные сжимающие напряжения. Трещина имеет плоский фронт и всегда распространяется перпендикулярно направлению действия внешней нагрузки.

2. Увеличение амплитуды цикла нагружения приводит к повышению скорости роста усталостной трещины.

Отметим и практическую значимость проблемы. В некоторых инженерных конструкциях, например в железнодорожных рельсах, в процессе их эксплуатации развиваются трещины, находящиеся в условиях знакопеременных преимущественно сжимающих напряжений. Поэтому важно установить причину их возникновения и механизм развития.

**2. Основные гипотезы и предположения.** 1. Рассматривается плоская задача. Образец имеет бесконечные размеры в плане и единичную толщину. Его материал сплошной и изотропный.

2. Изначально образец имеет протяженный дефект в виде сквозного разреза, трещины и т. п. Конфигурация дефекта такова, что его берега параллельны, а носик имеет скругленный вид.

3. Материал конструкции — пластичный и описывается диаграммой, имеющей линейный участок упрочнения. В зоне растягивающих напряжений диаграмма ограничена напряжениями  $\sigma_z$  — действительными напряжениями в момент разрыва. В зоне сжимающих напряжений диаграмма не ограничена и ее нижняя ветвь простирается до бесконечности. Так как в вершине дефекта возникает зона пластических деформаций, диаграмму деформирования материала будем рассматривать в осях интенсивность деформации ( $\varepsilon_i$ ) — интенсивность напряжений ( $\sigma_i$ ).

4. Материал образца относится к классу циклически стабильных. Это значит, что при повторно-переменном нагружении его механические характеристики остаются неизменными. Модули упругости и значения пределов текучести при растяжении и сжатии одинаковы. Эффект Баушингера не учитывается. Заметим, что большинство конструкционных материалов являются циклически упрочняющимися [6, 7]. Для таких материалов в процессе жесткого циклического нагружения предел текучести увеличивается.

5. Образец находится в поле переменных внешних сжимающих напряжений, приложенных на бесконечности. Считается, что максимальные напряжения цикла равны нулю. Это предположение не нарушает общности рассуждений, однако облегчает понимание процесса развития трещины. Минимальные напряжения цикла по величине не превышают предела текучести.

6. Критерий разрушения сводится к следующему условию: в процессе растяжения разрушение материала наступает в момент, когда интенсивность напряжений превышает значение  $\sigma_z$  — напряжения в момент разрыва. Сжатие материала не приводит к его разрушению.

**3. Механизм роста усталостной трещины.** Рассмотрим процесс нагружения образца внешней переменной сжимающей нагрузкой. В качестве параметра нагружения введем напряжения, действующие на бесконечности  $\sigma_0$ .

Прямой ход цикла: от напряжений  $\sigma_0 = 0$  до напряжений  $\sigma_0 = \sigma_{\min}$ . При увеличении абсолютного значения внешних напряжений берега разреза будут сходиться, и в результате трещина закроется, но не по всей длине [8]. Из-за того что ее вершина имеет скругленный вид, около носика дефекта будет присутствовать зона, в которой берега трещины не смыкаются. Зафиксируем трещину в момент, когда  $\sigma_0 = \sigma_{\min}$  (рис. 1). Отметим ключевые положения. Основная часть материала конструкции работает в упругой области. Зона отрицательных пластических деформаций имеет ничтожно малые размеры по отношению к размерам образца и непосредственно примыкает к носику трещины.

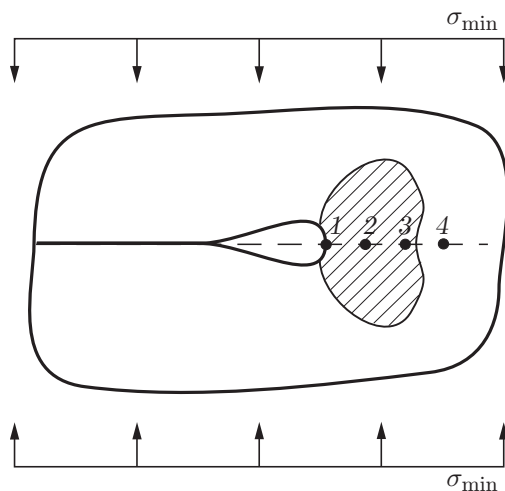


Рис. 1. Вид кончика дефекта при нагружении тонкого разреза сжимающими напряжениями (заштрихована область пластических деформаций)

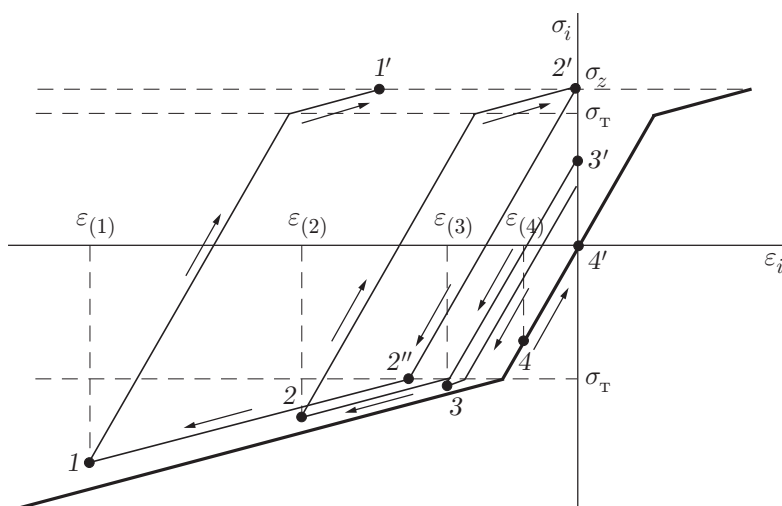


Рис. 2. Изменение напряженно-деформированного состояния точек образца, расположенных в области, примыкающей к вершине дефекта, в процессе циклического нагружения внешними сжимающими напряжениями

Существенно, что чем больше абсолютная величина  $\sigma_{\min}$ , тем на большей длине трещина закрывается, тем больше размеры пластической зоны и выше уровень пластических деформаций. Но никогда трещина не будет закрыта по всей длине.

Рассмотрим диаграмму деформирования материала (рис. 2). В момент, когда параметр нагружения достигнет значения  $\sigma_0 = \sigma_{\min}$ , точкам 1, 2, 3, 4, отмеченным на рис. 1, будут соответствовать точки на отрицательной ветви диаграммы. При этом в каждой из этих точек величины деформаций будут соответствовать значениям  $\varepsilon(1)$ ,  $\varepsilon(2)$ ,  $\varepsilon(3)$ ,  $\varepsilon(4)$ .

Обратный ход цикла: от напряжений  $\sigma_0 = \sigma_{\min}$  до напряжений  $\sigma_0 = 0$ . В момент полной нагрузки ( $\sigma_0 = \sigma_{\min}$ ) практически весь образец, за исключением весьма незначительной области около вершины трещины, работает в упругой области. Поэтому в процессе снятия внешних напряжений размеры конструкции должны полностью восстановиться. Для точек, находящихся в пластической зоне, такое нагружение является жестким. Следовательно, на обратном ходе цикла, по окончании которого внешние напряжения достигают

значения  $\sigma_0 = 0$ , все точки образца должны получить примерно те же деформации, которые они приобрели на прямом ходе, только противоположного знака.

Рассмотрим процесс разгрузки на диаграмме (см. рис. 2). Точка 1 по окончании обратного хода должна получить деформацию, приблизительно равную  $|\varepsilon_{(1)}|$ , т. е. разгрузиться до состояния  $\varepsilon_i \approx 0$ . Однако может наступить момент (заметим, что при этом параметр нагружения  $\sigma_0$  еще не равен нулю), когда напряжения в носике дефекта на обратном ходе достигнут значения  $\sigma_z$  (точка 1' на рис. 2). Дальнейшая разгрузка приведет к разрушению материала образца, расположенного в вершине дефекта. Очевидно, внутри пластической зоны имеется точка (точка 2 на рис. 1), в которой в конце обратного хода нагружения интенсивности напряжений и деформаций получают значения  $\sigma_i = \sigma_z$ ,  $\varepsilon_i = 0$  (точка 2' на рис. 2). Так как интенсивность напряжений не превысила величину  $\sigma_z$ , в этой точке разрушения не будет. Следовательно, материал образца, расположенный между точками 1 и 2 (рис. 1), разрушится и, таким образом, трещина на обратном ходе цикла нагружения подрастет от точки 1 до точки 2. Вновь образованные берега сформируют кончик трещины, который будет иметь скругленный вид. Это объясняется тем, что, во-первых, в конце обратного хода вершина дефекта нагружена растягивающими напряжениями (точка 2' на рис. 2) и, во-вторых, даже если предположить, что вплоть до разрушения материал работает в упругой области, то на кончике дефекта возникает особенность типа  $1/\sqrt{\rho}$  [2] ( $\rho$  — радиус закругления в вершине трещины). Если  $\rho = 0$  (носик трещины заострен), то напряжения будут равны бесконечности, что вызовет бесконечные деформации. Это приведет к затуплению вершины трещины. Как следствие величина напряжений упадет до конечных значений. Наличие у материала пластических свойств значительно увеличит радиус кривизны кончика трещины (это приведет к дальнейшему уменьшению напряжений в ее вершине) и сделает эти деформации необратимыми.

В точках, расположенных от вершины трещины дальше точки 2 (рис. 1), материал образца разрушаться не будет. После разгрузки эти точки приобретут деформации, близкие к нулю, и на диаграмме  $\sigma_i - \varepsilon_i$  будут располагаться на оси  $\sigma_i$  (на рис. 2 это, например, точка 3'). Точка 4 и все другие точки, находящиеся вне пластической зоны, после разгрузки будут описываться координатами  $\sigma_i = 0$ ,  $\varepsilon_i = 0$ .

Вид кончика трещины при циклическом нагружении представлен на рис. 3. Сплошной линией показано положение трещины в конце прямого хода нагружения ( $\sigma_0 = \sigma_{\min}$ ). В вершине трещины образовалась пластическая зона. Штриховая линия — положение трещины в конце обратного хода ( $\sigma_0 = 0$ ). На этот момент пластическая зона уменьшилась, расположенный в ней материал находится в растянутом состоянии. На следующем цикле нагружения, когда вершина трещины достигнет точки 2 (рис. 1), процесс нагружки пойдет по линии 2'-2'' (рис. 2) и далее — по участку упрочнения до точки 1. Цикл замкнулся. На обратном ходе предыдущего цикла трещина подросла от точки 1 до точки 2 на расстояние  $\Delta l$ . А далее, на прямом ходе следующего цикла пластическая зона сместится по ходу роста трещины и восстановит размеры, которые имела в конце прямого хода предыдущего цикла нагружения. Вид кончика трещины в конце прямого хода последующего цикла на рис. 3 показан пунктирной линией.

**4. Особенности деформирования в вершине тонкого разреза при циклическом нагружении сжимающей нагрузкой.** Для подтверждения идей, объясняющих развитие трещины в поле переменных сжимающих напряжений, выполнен численный эксперимент. С этой целью рассмотрено деформирование прямоугольной полосы размером  $400 \times 200$ , имеющей тонкий разрез длиной 200 мм и шириной 20 мкм, симметрично расположенный внутри полосы. Дефект имеет параллельные берега, его носик моделировался окружностью радиусом 10 мкм. Пластина нагружена переменными сжимающими напряжениями  $\sigma_0$ , действующими перпендикулярно направлению разреза. Модуль упругости

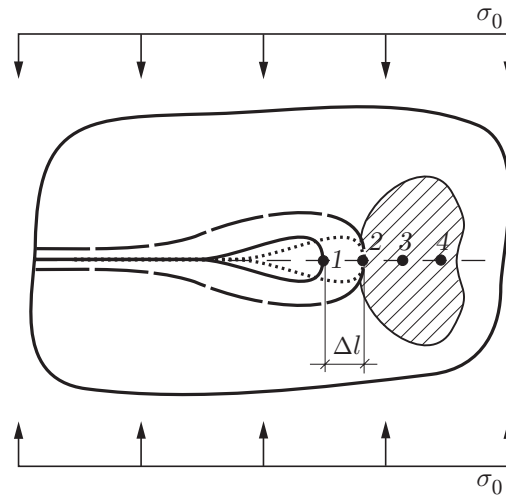


Рис. 3. Вид кончика трещины в процессе циклического нагружения сжимающей нагрузкой: сплошная линия — положение трещины в конце прямого цикла нагружения ( $\sigma_0 = \sigma_{\min}$ ); штриховая линия — положение трещины в конце обратного цикла нагружения ( $\sigma_0 = \sigma_{\max}$ ); пунктирная линия — положение трещины в конце следующего прямого цикла нагружения ( $\sigma_0 = \sigma_{\min}$ )

материала 200 ГПа, коэффициент Пуассона 0,28, предел текучести 250 МПа, диаграмма растяжения имеет линейный участок упрочнения с тангенциальным модулем 200 МПа. Задача решалась методом конечных элементов. По контуру носика разреза размещалось 20 узлов. Пластина находилась в условиях плоского напряженного состояния. Нагружение осуществлялось по специальной программе. Внешняя нагрузка  $\sigma_0$  росла по линейному закону от нуля и через 10 с достигла значения ( $-50$  МПа), после чего в последующие 10 с абсолютная величина этой нагрузки уменьшилась до нуля. Тем самым моделировался один цикл нагружения. Упругопластическая задача решалась методом малых упругопластических деформаций.

Приведем некоторые результаты расчета. В момент, когда  $\sigma_0 = -50$  МПа, на кончике трещины реализуются напряжения  $\sigma_y \approx -310$  МПа (рис. 4). Размер пластической зоны, рассчитанный с использованием критерия Мизеса, не превышает 11 мм. Заметим, что трещина закрывается не по всей длине. Незамкнутыми остаются небольшие фрагменты дефекта, отстоящие от носика разреза примерно на 2 мм. В момент полной разгрузки пластины напряжения в вершине трещины меняют знак и достигают величины  $\sigma_y = +351$  МПа (рис. 5). Обращает на себя внимание, что при пульсирующем нагружении образца напряжения в вершине разреза образуют цикл, близкий к симметричному, с небольшим преобладанием положительной компоненты и амплитудой, превосходящей в 6–7 раз абсолютные значения внешней нагрузки  $\sigma_0$ .

**5. Экспериментальная проверка.** Для экспериментальной проверки возможности зарождения и роста усталостных трещин в поле внешних сжимающих напряжений были изготовлены образцы из алюминиевого сплава Д16 (предел текучести 290 МПа, предел прочности 440 МПа) и отожженной рельсовой стали (предел текучести 520 МПа, предел прочности 720 МПа). Образцы представляли собой прямоугольные пластины толщиной около 10 мм, имеющие тонкие боковые иницирующие разрезы. Нагружение осуществлялось на пульсаторе ГРМ-1М с частотой 10 Гц. Минимальные напряжения цикла, рассчитанные как средние по “живому” сечению, для алюминиевых образцов составляли  $\sigma_{\min} \approx -200$  МПа, максимальные  $\sigma_{\max} \approx -20$  МПа. Для образцов из стали цикл нагружения определялся параметрами  $\sigma_{\min} \approx -375$  МПа,  $\sigma_{\max} \approx -65$  МПа. Во всех случаях из

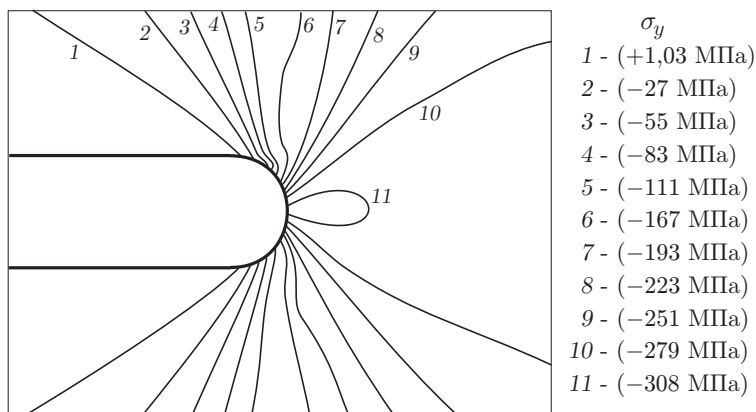


Рис. 4. Поле напряжений  $\sigma_y$  в области вершины тонкого разреза в момент полного нагружения образца внешней сжимающей нагрузкой ( $\sigma_0 = -50$  МПа)

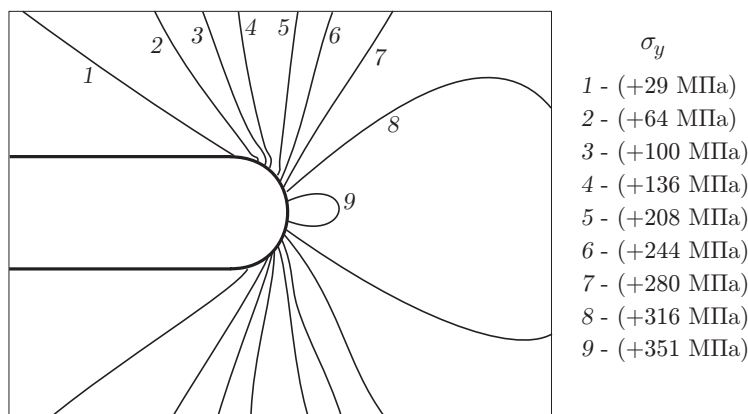


Рис. 5. Поле остаточных напряжений  $\sigma_y$  в области вершины тонкого разреза в момент полной разгрузки образца ( $\sigma_0 = 0$ )

кончиков инициаторов стартовали усталостные трещины и развивались перпендикулярно действию сжимающей нагрузки.

Первые 50 тыс. циклов нагружения алюминиевого образца можно рассматривать как малоцикловую усталость. Довольно быстро (примерно после 5 тыс. циклов) из заостренных концов иницирующих надрезов (1 на рис. 6) стартовали магистральные трещины (2 на рис. 6) и, продвигаясь перпендикулярно направлению действия внешней нагрузки, через 144 тыс. циклов нагружения достигли длины приблизительно 5 мм. После того как образец испытал 100 тыс. циклов нагружения, на поверхности образца вне иницирующих разрезов проявились периферийные трещины (3 на рис. 6). Расположение и направления периферийных трещин таковы, что они как бы охватывают магистральную трещину, которая стартовала ранее. Дальнейшее нагружение образца сопровождалось замедлением роста магистральной трещины и интенсивным развитием системы периферийных трещин. Они возникали и в областях, которые в начале эксперимента деформировались упруго. Данные экспериментов позволяют предполагать, что большинство периферийных трещин — сквозные, т. е. пронизывают конструкцию от фасадной поверхности до тыловой. На рис. 6 представлена поверхность алюминиевого образца через 450 тыс. циклов нагружения.

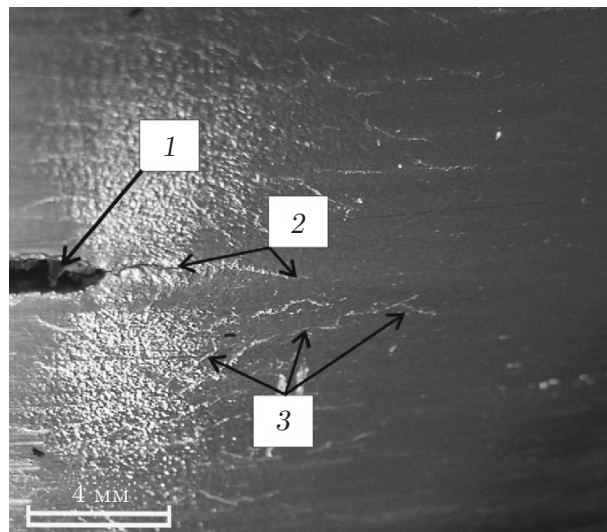


Рис. 6. Поверхность алюминиевого образца после 450 тыс. циклов нагружения: 1 — инициатор трещины; 2 — магистральная трещина; 3 — периферийные трещины

**6. Выводы.** Рассмотренная схема возникновения и развития усталостных трещин во многом объясняет данные экспериментов по изучению роста трещин, находящихся в поле сжимающих напряжений [4, 5]. Отметим наиболее существенные положения.

1. Усталостная трещина, находящаяся в поле сжимающих напряжений, всегда будет распространяться по траектории перпендикулярно направлению действия максимальных сжимающих напряжений. Именно в этих точках дефекта при нагружении образца абсолютные значения пластических деформаций достигают максимального значения. Поэтому здесь возникают наиболее благоприятные условия для старта и развития трещины. В подтверждение этого тезиса приведем данные из работы [5]. Рассматривая разные виды инициатора трещины, авторы отмечают, что всякий раз трещина либо сразу стартует перпендикулярно направлению “минимальных главных напряжений ( $\sigma_3$ )”, либо, если изначально плоскость инициатора не совпадает с плоскостью минимальных напряжений, она по мере роста поворачивается, пока ее фронт не “становится плоским” и не “ориентируется в направлении, перпендикулярном направлению приложения нагрузки”. Таким образом, в большинстве случаев невозможно добиться, чтобы усталостная трещина развивалась по механизму разрушения типа  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  или смешанного типа.

2. Скорость роста усталостной трещины пропорциональна амплитуде цикла нагружения. В самом деле, скорость роста трещины пропорциональна отрезку, на который она подрастает на одном цикле нагружения ( $\Delta l$  на рис. 3). Величина этого отрезка при неизменном значении максимальных напряжений цикла нагружения определяется уровнем пластического деформирования в вершине дефекта, который, в свою очередь, зависит от значения сжимающих напряжений, т. е. от амплитуды цикла нагружения. Этот факт подтвержден экспериментально [4, 5].

3. Существует некоторое значение сжимающих напряжений  $\sigma_0$  (или амплитуды цикла), до достижения которого усталостная трещина вообще не будет развиваться. Если минимальные напряжения цикла нагружения таковы, что деформация точки  $\varepsilon$ , расположенной в вершине трещины, находится в интервале  $0 \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_{(2)}|$  (см. рис. 2), то в конце обратного хода цикла растягивающие напряжения не будут превосходить  $\sigma_Z$ , и трещина, таким образом, не будет развиваться.

4. Скорость роста усталостной трещины не зависит от ее длины (см. [4]). Так как пластическая зона формируется при сжатии образца, то в условиях, когда трещина закрывается не на всю длину, уровень пластических деформаций определяется прежде всего незамкнутым фрагментом дефекта, размер которого не зависит от общей длины трещины.

5. Если образец нагружен знакопеременным циклом, то, рассматривая механизм распространения усталостной трещины, следует обязательно учитывать влияние отрицательной компоненты.

Автор выражает благодарность М. Х. Ахметзянову за конструктивное участие в обсуждении основных положений работы, а также О. Е. Ключко за предоставленные данные по расчету полосы с тонким разрезом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Черепанов Г. П.** Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.
2. **Пестриков В. М., Морозов Е. М.** Механика разрушения твердых тел. СПб.: Профессия, 2002.
3. **Mair R. I., Groenhaut R.** The growth of transverse fatigue defects in the head of railway rails // Rail Intern. 1980. N 12. P. 675–690.
4. **Крысанов Л. Г., Тырин В. П., Шабанов А. П.** Влияние сжимающих напряжений на развитие усталостных трещин в рельсах // Повышение надежности верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации: Сб. науч. тр. Всерос. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. / Под ред. Л. Г. Крысанова. М.: Интекст, 2000. С. 55–59.
5. **Тихомиров В. М., Суровин П. Г.** Развитие усталостных трещин смешанного типа в образцах из стали // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 1. С. 135–142.
6. **Павлов П. А.** Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988.
7. **Коцаньда С.** Усталостное разрушение металлов. М.: Metallurgia, 1976.
8. **Гольдштейн Р. В., Житников Ю. В.** Равновесие полостей и трещин-разрезов с областями налегания и раскрытия в упругой среде // Прикл. математика и механика. 1986. Т. 50, № 5. С. 826–834.

*Поступила в редакцию 6/VII 2004 г.,  
в окончательном варианте — 28/I 2005 г.*

---