

Сазанов В.П., Письмаров А.В., Шадрин В.К., Пилипив О.М., Скачкова Е.Ю.

**ОСОБЕННОСТИ РАСКРЫТИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ
В УПРОЧНЁННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ
С КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРЯЖЕНИЙ**

Обнаруженное и исследованное В. Эльбером явление закрытия трещины [1] проявляется только лишь при переменных циклах нагружения деталей. Оно состоит в том, что поверхности трещины вблизи её фронта соприкасаются на определённой доле положительной части цикла. Полностью они расходятся только при увеличении растягивающей нагрузки, а затем снова смыкаются при её снижении. Причина закрытия трещины – остаточное увеличение толщины её приповерхностного слоя, который непрерывно образуется при пересечении растущей трещиной пластической зоны около её фронта. Существенную роль здесь играют возникающие во время разрушения шероховатость и неровности излома (в первую очередь боковые приповерхностные утяжки), из-за которых трещина закрывается путём контакта лишь на отдельных малых участках. Возможны и другие причины, ведущие к заполнению трещины (воздействие окружающей среды, попадание в трещину посторонних предметов и т.д.). Закрытие трещины сильно влияет на кинетику её роста при малых коэффициентах асимметрии цикла ($R \leq 0,6$), когда приросты толщины приповерхностных слоёв трещины соизмеримы с её раскрытием. Закрытие трещины – одна из основных причин резкого замедления её роста и остановки с понижением размаха коэффициента интенсивности напряжений (КИН).

Вполне разумно предположить, что данное явление более характерно для трещин большой длины, когда связанный с её размером радиус пластической зоны также будет значительным. Однако явление закрытия трещины, причём с бóльшей продолжительностью положительной части цикла нагружения, возникает в упрочнённых деталях, у которых присутствует тонкий слой со сжимающими остаточными напряжениями. Наибольший эффект будет проявляться тогда, когда размер трещины соизмерим с глубиной упрочнённого слоя.

Как показали многочисленные исследования [2-5], во всех упрочнённых образцах из разных материалов и с различными типами концентраторов напряжений наблюдались нераспространяющиеся трещины усталости, а в образцах без остаточных напряжений такие трещины отсутствовали. Нераспространяющиеся трещины были и на изломах разрушившихся до базы испытаний упрочнённых образцов, причём размер этих трещин соответствует и образцам, прошедшим базу испытаний без разрушения. Для образцов,

испытанных при напряжениях, меньших предела выносливости, глубина нераспространяющейся трещины тем меньше, чем меньше напряжение от внешних сил.

На основании многочисленных экспериментов установлено, что предел выносливости упрочнённых образцов и деталей с концентраторами напряжений связан с остановкой усталостной трещины на критической глубине $t_{кр}$ [2-6]. В связи с этим в данной работе была поставлена задача исследования характера поведения усталостной трещины при положительной части симметричного цикла напряжений для таких деталей в диапазоне глубины, охватывающим критическую глубину $t_{кр}$.

В проведённом исследовании были использованы экспериментальные результаты изучения влияния гидродробеструйной обработки (ГДО) на предел выносливости цилиндрических образцов диаметром $D = 10$ мм с полукруглым надрезом радиусом 0,3 мм из стали 45 через величину и распределение остаточных напряжений поверхностного слоя [2]. Гладкие образцы и образцы-свидетели подвергались ГДО в течение 8 минут дробью диаметром 2 мм при давлении масла 0,28 МПа. В качестве образцов-свидетелей использовались втулки с наружным диаметром 51,5 мм и внутренним 45 мм, которые применяются для определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя методом колец и полосок [6]. На рис. 1 приведена эпюра осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя в образце-свидетеле после ГДО, обработанном одновременно с гладкими образцами.

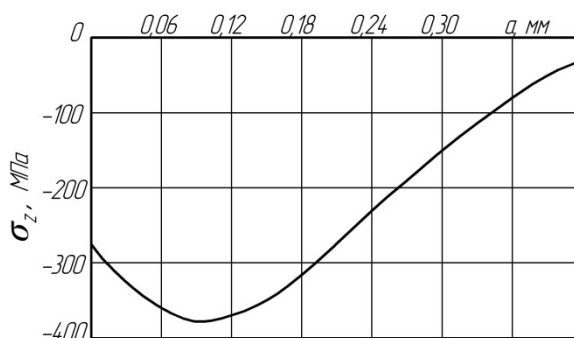


Рис. 1. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образце-свидетеле из стали 45 (втулка диаметром 51,5x45 мм) после ГДО

По результатам испытаний на усталость (изгиб с вращением в случае симметричного цикла) предел выносливости σ_{-1} неупрочнённых образцов составил 155 МПа, а упрочнённых – 225 МПа. При этом в упрочнённых образцах были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости глубиной около 0,2 мм.

В данной работе расчёты выполнялись методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса ANSYS. При моделировании цилиндрического образца с трещиной был применён гармонический осесимметричный конечный элемент типа PLANE 83 объёмного напряжённо-деформированного состояния с восемью узлами, который позволяет на модели выполнять нагрузки растяжения-сжатия и изгиба. Для моделирования контакта берегов трещины использован элемент нелинейной связи типа CONTA172, TARGE16. Моделирование остаточного напряжённо-деформированного состояния выполнено методом термоупругости [7]. Расчёты и анализ раскрытия трещины в упрочнённых и неупрочнённых образцах с концентратором напряжений в виде полукруглого надреза радиусом 0,3 мм выполнены при глубине l трещины от 0,05 мм до 1,00 мм. Фрагменты раскрытия трещины для глубины $l = 1$ мм приведены на рис. 2 и 3. При этом действующие напряжения цикла от внешней силы приведены к наименьшему сечению образца.

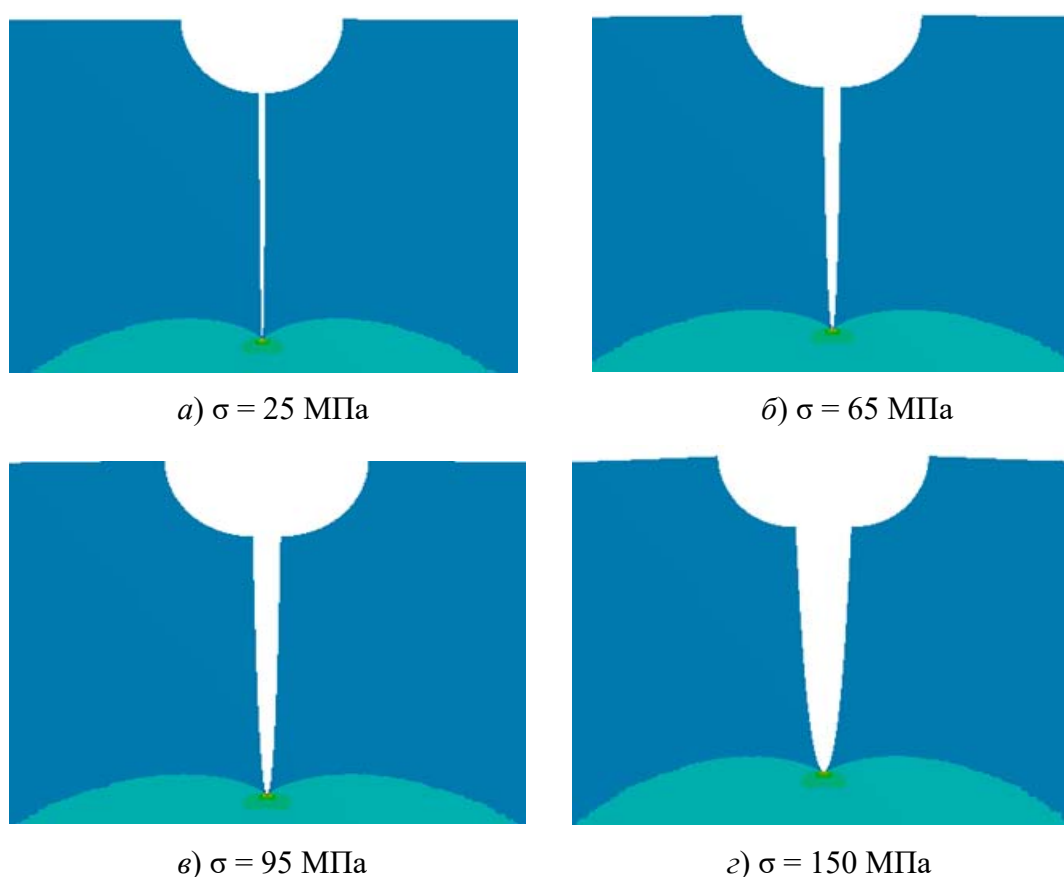


Рис. 2. Фрагменты раскрытия трещины в неупрочнённом образце при положительном полуцикле напряжений и глубине $l = 1$ мм

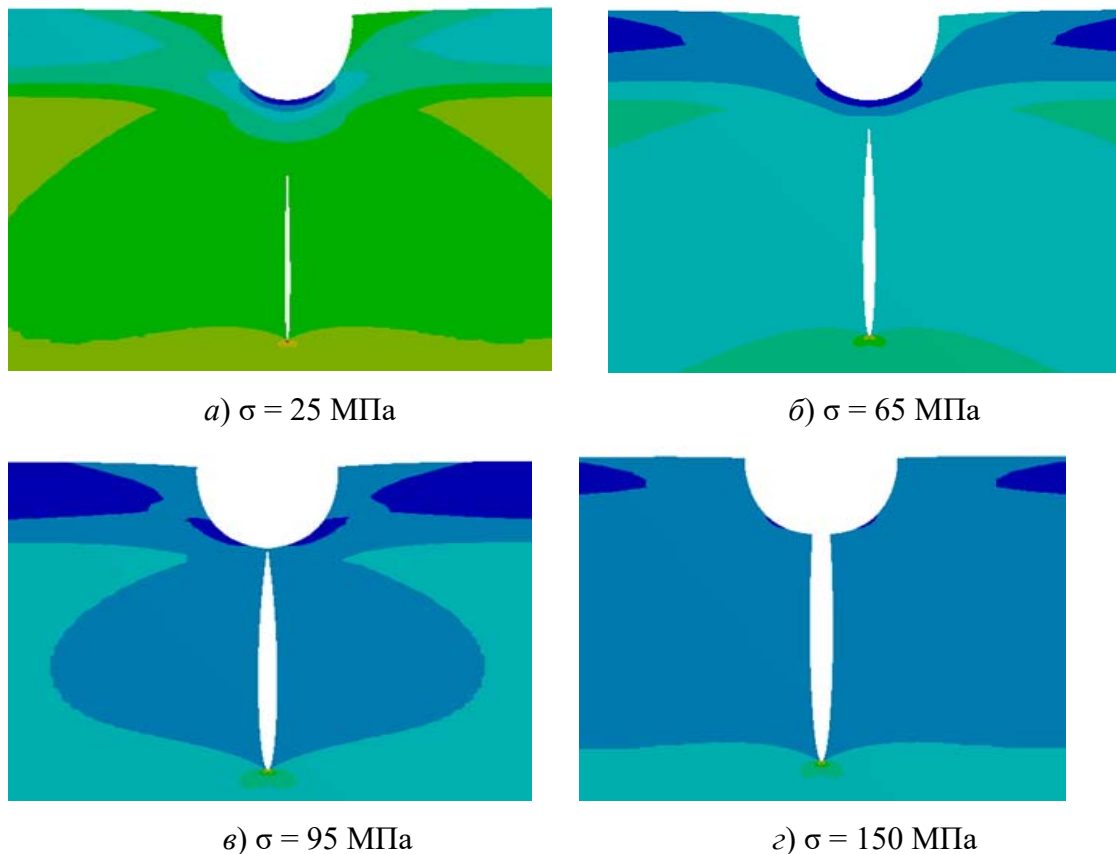


Рис. 3. Фрагменты раскрытия трещины в упрочнённом образце при положительном полупериоде напряжений и глубине $l = 1 \text{ мм}$

Анализ фрагментов раскрытия трещины в упрочнённых образцах показывает, что данный процесс при положительном полупериоде напряжений протекает по двум силовым схемам: с контактом берегов трещины и без их контакта. В неупрочнённых образцах процесс раскрытия протекает только по одной силовой схеме без контакта берегов трещины. Очевидно, что достаточно продолжительный контакт берегов трещины в упрочнённых образцах связан с действием сжимающих остаточных напряжений в упрочнённом слое. На рис. 4 в зависимости от глубины трещины приведен график напряжений положительной части цикла, при которых нарушается контакт берегов усталостной трещины упрочнённого образца. При этом глубина нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ для цилиндрического образца диаметром $D = 10 \text{ мм}$ с полукруглым надрезом радиусом $0,3 \text{ мм}$ составляет около $0,2 \text{ мм}$. Из графика следует, что с увеличением глубины значение напряжения отрыва берегов трещины уменьшается.

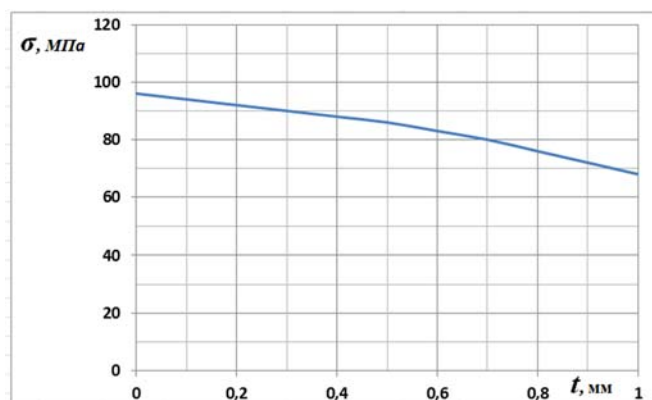


Рис. 4. Напряжения, соответствующие началу полного отрыва берегов трещины упрочнённого образца

Таким образом, полученные результаты расчётов свидетельствуют о том, что упрочнённый слой со сжимающими остаточными напряжениями оказывает существенное влияние на характер раскрытия усталостной трещины у деталей с концентраторами напряжений и, очевидно, на скорость её роста. Это приводит к уменьшению размаха КИН и, следовательно, к значительному снижению скорости её роста в соответствии с зависимостью Пэриса [1].

Заключение

Проведённое исследование показывает, что развитие усталостной трещины в упрочнённых деталях с концентраторами напряжений имеет свои особенности по сравнению с неупрочнёнными. Основная особенность заключается в том, что в упрочнённой детали за цикл нагружения (в случае симметричного цикла) трещина находится в закрытом состоянии более длительный период, чем в неупрочнённой.

Библиографический список

1. Троценко, В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении [Текст] / В.Т. Троценко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 256 с.
2. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям: монография [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
3. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.
4. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I.

Сплошные детали [Текст]/ В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №8. – С. 22-26.

5. Кирпичёв, В.А., Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений [Текст]/ В.А. Кирпичёв, А.П. Филатов, О.В. Каранаева, А.В. Чирков, О.Ю. Семёнова // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ – 2011. – С. 678-685.

6. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок [Текст]/ С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.

7. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании [Текст] / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. – 2011. – №3(27). – Ч. 3. – С. 171-174.