

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОСТАНОВКИ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ОБРАЗЦЕ С НАДРЕЗОМ

© 2018

В. П. Сазанов кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; sazanow@mail.ru

С позиций линейной механики разрушения исследовано явление остановки развития усталостной трещины в цилиндрических образцах с концентраторами напряжений, подвергнутых технологическим операциям упрочнения поверхности. В качестве критерия рассмотрен коэффициент интенсивности напряжений (КИН), размах которого в случае циклического нагружения определяет скорость роста усталостной трещины. Расчётная часть исследования выполнена методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса ANSYS. Расчётный комплекс ANSYS, использующий метод конечно-элементного моделирования в форме перемещений, применён при определении коэффициента интенсивности напряжений при изгибе цилиндрического образца диаметром 10 мм с полукруглым надрезом радиусом 0,5 мм без упрочнения и с упрочнением поверхности. Установлено, что на начальном участке развития усталостной трещины КИН имеет два экстремума: максимальное и минимальное значение. Результаты расчёта показывают, что в случае цилиндрического образца с надрезом и с упрочнением поверхности минимальное значение КИН оказывается меньше его порогового значения, ниже которого трещина не развивается. Данный факт хорошо согласуется с результатами испытаний этих образцов, так как только в них были выявлены нераспространяющиеся трещины усталости. Также установлено, что при максимальном значении коэффициента интенсивности напряжений глубина трещины составляет величину, равную примерно 0,02 от наименьшего размера сечения цилиндрического образца. Проведённое исследование подтверждает обоснованность использования критерия среднеинтегральных остаточных напряжений для расчёта приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов и деталей с концентраторами за счёт сжимающих остаточных напряжений.

Концентратор напряжений; нераспространяющаяся трещина усталости; линейная механика разрушения; коэффициент интенсивности напряжений; цилиндрический образец; конечно-элементное моделирование; предел выносливости.

Цитирование: Сазанов В.П. Исследование закономерностей остановки усталостной трещины в цилиндрическом образце с надрезом // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 1. С. 160-169. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-160-169

Введение

При испытаниях на усталость, а также при анализе эксплуатационных разрушений деталей машин, работавших при переменных нагрузках, наблюдаются случаи, когда возникшая усталостная трещина останавливается в своём развитии [1-3]. Это явление является характерным для деталей или образцов с концентраторами напряжений – галтелями, буртами, надрезами, неподвижными посадками, резьбой и рядом других видов. Но наиболее часто нераспространяющиеся трещины усталости проявляются в деталях с концентраторами напряжений и подвергнутых различным видам поверхностного упрочнения. В связи с этим принято различать пределы выносливости образцов и деталей по трещинообразованию и по разрушению. Для гладких поверхностно упрочнённых и неупрочнённых образцов разница между пределами выносливости по трещинообразованию и по разрушению практически отсутствует. Вместе с тем для упроч-

нённых деталей и образцов с концентраторами напряжений данные характеристики сопротивления усталости могут различаться значительно.

Явление остановки развития усталостной трещины весьма сложно и до настоящего времени ещё полностью не изучено. Нераспространяющиеся трещины были обнаружены экспериментально на практике и в столь различных условиях циклического деформирования образцов из самых разнообразных материалов, что невозможно было объяснить их существование с позиций единого механизма. Вместе с тем имеется много исследований, в которых предложены схемы, объясняющие природу появления нераспространяющихся трещин в частных случаях и в той или иной степени учитывающие действительное распределение напряжений, деформаций и свойств материала около вершины трещины. Реально, в зависимости от конкретных условий работы детали и свойств материала, действует некоторое сочетание факторов, результирующее действие которых и приводит к остановке развития усталостной трещины.

Сопротивление усталости материалов в общем случае зависит от трёх групп факторов, связанных, во-первых, с характером напряжённо-деформированного состояния (НДС) детали или образца, во-вторых, со свойствами материала, в-третьих, с воздействием окружающей среды. В основном именно с этих позиций и рассматриваются причины остановки роста усталостной трещины. Вместе с тем наибольшее распространение получили различные схемы, объясняющие причину существования нераспространяющихся усталостных трещин изменением напряжённого состояния у вершины трещины в связи с её ростом.

Отдельного внимания заслуживает рассмотрение причин остановки усталостной трещины с позиций линейной механики разрушения, так как в этом случае такая оценка результатов испытаний на усталость имеет то преимущество, что сведения, полученные на образцах различной конфигурации, могут быть приведены к единому сопоставимому виду. В этом случае результаты испытаний любых образцов, для которых существует точное решение для определения коэффициента интенсивности напряжений, могут быть сопоставлены по этому параметру без каких бы то ни было ограничений. Проще в этом случае осуществить переход от данных, полученных на лабораторных образцах, к реальным конструкциям. Основным параметром, обобщающим условия нагружения материала при вершине трещины, является коэффициент интенсивности напряжений K (КИН), зависящий одновременно от уровня нагружения и длины трещины. Перепад (размах) этого коэффициента $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ определяет скорость роста усталостной трещины согласно уравнению, предложенному Пэрисом [1]:

$$dt / dN = C(\Delta K)^n, \quad (1)$$

где t – длина трещины; N – число циклов нагружения; C – константа, зависящая от свойств материала и режима нагружения; n – показатель степени, изменяющийся в зависимости от свойств материала от 1 до 6.

Экспериментально доказано [4], что существует минимальное значение K , ниже которого рост трещины невозможен. Зависимость отношения K_I / K_{IC} (где K_I – интенсивность напряжений у вершины исходной усталостной трещины, K_{IC} – критическая интенсивность напряжений или вязкость разрушения) от числа циклов до полного разрушения образца, характеризующая условия разрушения при циклическом деформировании, имеет асимптоту (рис. 1). Диаграмма на рис. 1 показана в полулогарифмических координатах и в предположении, что база испытаний на усталость $N_0 = 10^7$ циклов нагружения.

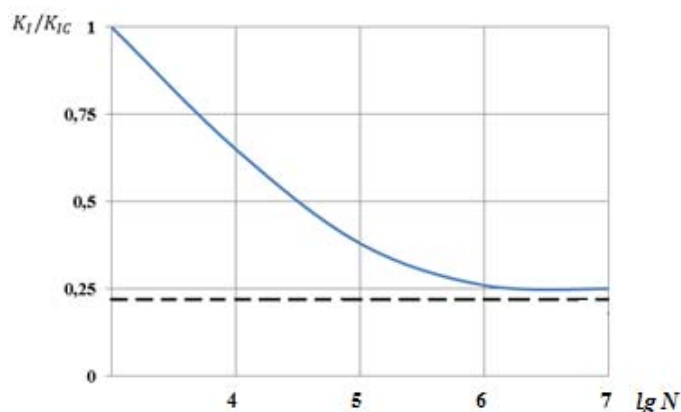


Рис. 1. Зависимость исходной интенсивности напряжений от числа циклов до разрушения

На практике в качестве параметра, соответствующего асимптоте на рис. 1, принимают пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений [4], которое обозначается K_{th} и является характеристикой вязкости разрушения материала совместно с критическим значением K_{1c} .

Уравнение (1) описывает среднюю (линейную) область полной диаграммы усталостного разрушения, которая в большинстве случаев имеет S-образный вид (рис. 2).



Рис. 2. Диаграмма усталостного разрушения в логарифмических координатах (схема):
 I, III – области низких и высоких скоростей роста трещины;
 II – область справедливости уравнения Пэриса

Отсюда следует, что для исследования закономерностей образования нераспространяющихся усталостных трещин с практической точки зрения наибольший интерес представляет область I низких скоростей роста трещины (рис. 2). В этом случае вполне обоснованно предположить, что остановка трещины может произойти, если при определенных условиях коэффициент интенсивности напряжений окажется ниже его порогового значения K_{th} . Поскольку решить подобную задачу и провести исследования с использованием приведённых в справочных материалах формул не представляется возможным, то были выбраны численные методы расчётов с использованием САЕ-систем (ANSYS). В исследовании рассматривалась трещина типа «разрыв», когда перемещения берегов трещины перпендикулярны её плоскости (тип I).

Постановка задачи

Решение задачи о влиянии глубины трещины на коэффициент интенсивности напряжений в деталях с концентраторами напряжений невозможно выполнить некоторым универсальным методом. Поэтому целесообразно рассмотреть частные случаи остановки усталостной трещины при испытаниях. При разработке методики прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей [5-7] был исследован значительный объём результатов испытаний на усталость. На основании этих исследований методами математической статистики было установлено, что критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости в упрочнённых деталях с концентраторами напряжений составляет $t_{кр} = 0,0216D$, где D – наименьший размер поперечного сечения детали. Анализ результатов измерения $t_{кр}$ показал, что её величина определяется только размерами поперечного сечения детали и не зависит от материала.

Поставлена задача определить с помощью расчётных методов закономерности образования нераспространяющейся трещины усталости в отдельном случае.

Метод решения

Для проведения исследования был выбран случай испытания на усталость цилиндрических образцов из стали 20 с полукруглым надрезом радиуса $\rho_0 = 0,5$ мм и диаметром гладкой части $d = 10$ мм, упрочнённых пневмодробеструйной обработкой (ПДО) [5]. При этом концентратор напряжений изготавливался после упрочняющей обработки поверхности. На представленной фотографии (рис. 3) чётко видна нераспространяющаяся трещина усталости 2, которая имеет концентрическую форму, так как в этом случае испытания на усталость проводились при чистом изгибе с вращением образцов.

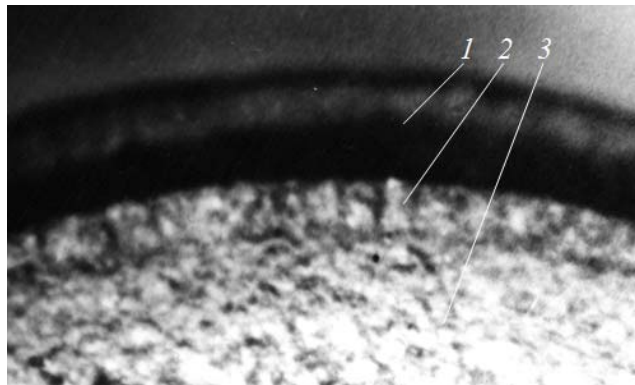


Рис. 3. Фрагмент излома упрочнённого дробью образца диаметром $d = 10$ мм с надрезом $\rho_0 = 0,5$ мм из стали 20:
1 – надрез; 2 – нераспространяющаяся трещина; 3 – зона долома

Отметим также, что нераспространяющаяся трещина усталости выделяется от зоны долома более светлым мелкозернистым фоном по причине длительного взаимного притирания берегов трещины после её остановки. В неупрочнённых образцах с концентраторами нераспространяющиеся трещины усталости обнаружены не были.

Расчётная часть исследований по установлению зависимости коэффициента интенсивности напряжений K_I от глубины трещины выполнялась методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса ANSYS.

Основные результаты исследований

В проведённом исследовании в зависимости от размера трещины изучено изменение коэффициента интенсивности напряжений K_I в цилиндрических образцах диаметром $d = 10$ мм с концентратором в виде полукруглого надреза радиусом $\rho_0 = 0,5$ мм с упрочнением поверхности и без упрочнения. В среде программного продукта ANSYS был проведён расчёт K_I при следующих условиях:

- решалась статическая упругая задача;
- материал образца принимался изотропным с механическими характеристиками стали 20 ($\sigma_T = 395$ МПа; $\sigma_B = 522$ МПа; $\delta = 26,1\%$; $\psi = 65,9\%$);
- моделирование остаточного напряжённо-деформированного состояния выполнено методом термоупругости [8] с использованием расчётно-экспериментальной зависимости осевых остаточных напряжений σ_z по толщине упрочнённого слоя a [5;9], приведённой на рис. 4.

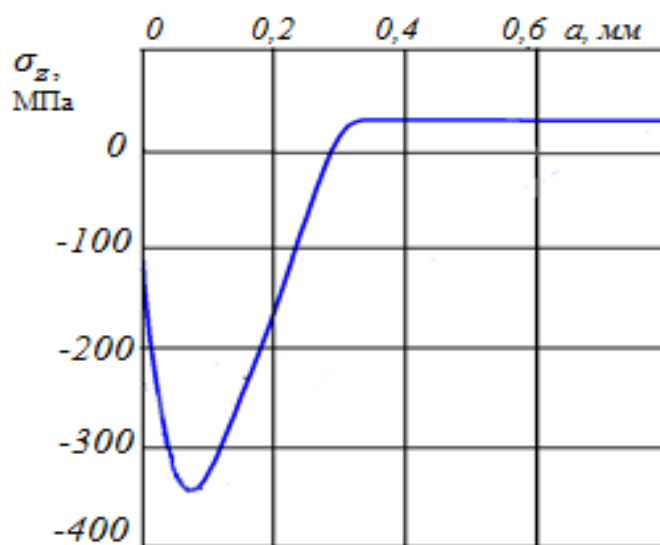


Рис. 4. Остаточные напряжения в гладких сплошных образцах диаметром $d = 10$ мм из стали 20 после пневмодробеструйной обработки

При моделировании был использован гармонический осесимметричный конечный элемент типа PLANE183 объёмного НДС с восемью узлами. Граничные условия назначались исходя из условия симметрии модели. На торце (без надреза) задавалась распределённая нагрузка, изменяющаяся по гармоническому закону по окружности и соответствующая изгибающему моменту, который создаёт в наименьшем сечении максимальные растягивающие напряжения 137,5 МПа [5]. Данное значение напряжений соответствует пределу выносливости σ_{-1} , которое было получено при испытаниях упрочнённых образцов. Отметим, что предел выносливости неупрочнённых образцов составил 120 МПа. Изменение коэффициента интенсивности напряжений K_I при увеличении глубины трещины t для образцов с упрочнением поверхности и без упрочнения показано на рис. 5.

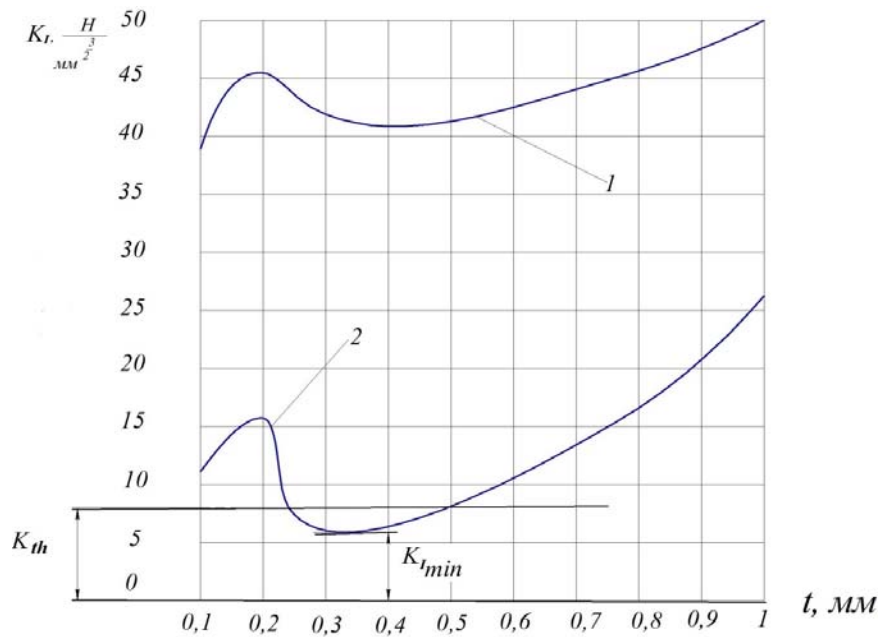


Рис. 5. Изменение коэффициента интенсивности напряжений K_I при увеличении глубины трещины в образцах диаметром $d=10$ мм с надрезом $\rho_0=0,5$ мм из стали 20:
1 – поверхность без упрочнения; 2 – поверхность упрочнена (ПДО)

Значения коэффициентов интенсивности напряжений K_I , приведённые на рис. 5 в виде зависимостей 1 и 2, определялись применительно к максимальному напряжению при изгибе 137,5 МПа, при котором в упрочнённых образцах были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости. Необходимо отметить, что наличие сжимающих остаточных напряжений в упрочнённом слое образцов с концентратором приводит к значительному снижению коэффициента интенсивности напряжений на рассматриваемом интервале размеров трещины. Вполне очевидно предположить, что это обстоятельство является причиной повышения предела выносливости упрочнённых деталей по сравнению с неупрочнёнными.

Из данных рис. 5 следует, что для образцов рассматриваемого размера с концентратором на начальном участке роста трещины наблюдаются два экстремума коэффициента интенсивности напряжений – максимальное и минимальное значения. Следует отметить, что в упрочнённом образце значительно выше разница (размах) между экстремальными значениями. Причина такого характера зависимости K_I от размера трещины для образцов с концентратором следующая. Исходное поле напряжений оказывает влияние только на напряжения, необходимые для возникновения трещины. В начальный период развития из-за малой длины, несмотря на очень высокий градиент напряжений у её вершины, трещина оказывает незначительное влияние на исходное поле напряжений у концентратора. Однако, начиная с некоторой глубины, при которой влияние концентратора ослабевает, а размер трещины становится значительным, определять дальнейшее развитие трещины начинает концентрация напряжений у её вершины. Необходимым условием развития трещины является наличие в образце к этому моменту напряжений, величина которых полностью определяется трещиной как концентратором напряжений. В этот момент образцы с любыми концентраторами напряжений превращаются в образцы с одинаковым и предельно резким концентратором напряжений – трещиной. Остановка роста трещины возможна в том случае, когда минимальное значение K_I будет меньше его порогового значения K_{th} . Судя по характеру зависимо-

стей рассмотренных образцов такое возможно только в образцах с концентратором и упрочнённой поверхностью. Приведённое на рис. 5 значение K_{th} принято в соответствии со справочными материалами работы [4] для конструкционных сталей. В неупрочнённых образцах с концентраторами нераспространяющиеся трещины усталости обнаружены не были. Таким образом, полученные результаты расчёта достаточно точно подтверждаются результатами испытаний на усталость рассматриваемых образцов [5].

Как и в ранее проведённых исследованиях [10], установлено, что коэффициент интенсивности напряжений K_I достигает максимального значения при глубине трещины, равной примерно $0,02D$, где D – диаметр в наименьшем сечении детали (образца). Отметим, что положение экстремума не зависит от того, упрочнена или неупрочнена поверхность образцов. Полученный результат достаточно точно согласуется с размером критической глубины t_{kp} нераспространяющейся трещины усталости для сплошных цилиндрических образцов и деталей с концентраторами напряжений, определяемый по формуле $t_{kp} = 0,0216D$ [5;6]. Из этого вытекает весьма важное определение, что t_{kp} – это граница влияния концентратора напряжений на коэффициент интенсивности напряжений K_I и, соответственно, на скорость роста усталостной трещины, но при этом ещё значительным остаётся влияние при вершине трещины концентрации сжимающих остаточных напряжений от упрочнённого слоя детали. Поэтому вполне обоснованно проводить оценку влияния сжимающих остаточных напряжений на приращение предела выносливости на границе, соответствующей критической глубине нераспространяющейся трещины усталости t_{kp} .

Дополнительно необходимо показать правомочность применения положений линейной механики разрушения в рассматриваемом случае, в котором при испытаниях на усталость были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости. Как известно [4], коэффициент интенсивности напряжений есть мера напряжений в окрестности вершины трещины, но он сохраняет своё значение только тогда, когда зона пластичности мала. Только в этом случае можно утверждать, что степень распространения трещины за цикл будет также определяться коэффициентом интенсивности напряжений.

Выполним оценку коррекции на зону пластичности по Ирвину [11] для плоского деформированного состояния:

$$r_p^* \approx \frac{1}{6\pi} \cdot \frac{K_I^2}{\sigma_T^2},$$

где r_p^* – расстояние от вершины трещины до края зоны пластичности; σ_T – предел текучести материала.

Для рассматриваемого случая при $\sigma_T = 395$ МПа, $K_I \approx 16$ Н/мм^{3/2} (рис. 5):

$$r_p^* = 0,000087 \text{ мм.}$$

Для глубины трещины $t = 0,02D = 0,18$ мм это составляет всего 0,048%.

На основании полученного результата можно утверждать, что положения линейной механики разрушения на этапе остановки трещины усталости будут соблюдаться.

Заключение

С позиций линейной механики разрушения причиной остановки развития усталостной трещины в цилиндрических образцах с надрезом и упрочнённой ПДО поверхностью является падение коэффициента интенсивности напряжений K_I ниже уровня его порогового значения K_{th} на критической глубине. Результаты расчётов показали достаточное совпадение с результатами испытаний на усталость цилиндрических образцов диаметром $d = 10$ мм с полукруглым надрезом $\rho_0 = 0,5$ мм из стали 20.

Библиографический список

1. Кудрявцев П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины. М.: Машиностроение, 1982. 174 с.
2. Кудрявцев П.И., Морозова Т.И. Развитие усталостных трещин в сталях в связи с поверхностным наклёпом // Сб. статей «Исследования по упрочнению деталей машин». М.: Машиностроение, 1972. С. 194-200.
3. Кудрявцев П.И. Некоторые особенности строения трещин усталости в низкоуглеродистой стали // В сб.: «Повышение прочности и долговечности деталей машин». № 110. М.: Машиностроение, 1969. С. 105-113.
4. Трощенко В.Т., Покровский В.В., Прокопенко А.В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. Киев: Наукова Думка, 1987. 256 с.
5. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. 125 с.
6. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1988. № 8. С. 22-26.
7. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1988. № 12. С. 37-40.
8. Сазанов В.П., Чирков А.В., Самойлов В.А., Ларионова Ю.С. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. № 3 (27), ч. 3. С. 171-174.
9. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Сб. трудов «Остаточные напряжения». Вып. 53. Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1971. С. 32-42.
10. Кирпичёв В.А., Сазанов В.П., Сургутанов Н.А., Шадрин В.К. О связи коэффициента интенсивности напряжений и нераспространяющейся трещины усталости // Сборник материалов X Всероссийской научной конференции по механике деформируемого твёрдого тела. Т. 2. Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. С. 23-25.
11. Брок Д. Основы механики разрушения. М.: Высшая школа, 1980. 368 с.

ANALYSIS OF THE MECHANISM OF FATIGUE CRACK ARREST IN A CYLINDRICAL NOTCHED SPECIMEN

© 2018

V. P. Sazanov Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Strength of Materials;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
sazanow@mail.ru

The phenomenon of fatigue crack arrest in surface-hardened cylindrical specimens with stress concentrators is examined from the perspective of linear fracture mechanics. The stress intensity coefficient (SIC) is considered as the criterion, its scope determines the speed of fatigue crack growth in the case of cyclic loading. The calculations of the study were carried out by the Finite Elements Modeling method using the calculation complex ANSYS. The calculation complex ANSYS that uses the Finite Elements Modeling method in the form of displacements was applied to determine the stress intensity coefficient under bending of cylindrical surface-hardened and non-hardened specimens with the diameter of 10 mm with a semicircular notch with the radius of 0,5 mm. It is established that the stress intensity coefficient has two extremes in the initial area of the fatigue crack development: the minimum and maximum values. The results of the calculation indicate that the minimum value of SIC is lower than its threshold value below which the crack does not develop in the case of a cylindrical surface-hardened notched specimen. This fact is in good agreement with the results of tests of these specimens as non-propagating fatigue cracks were revealed in these specimens only. It is also established that the depth of a crack is approximately 0,02 of the minimum size of the section of a cylindrical specimen for the maximum value of the stress intensity coefficient. The study carried out validates the use of the criterion of average integral residual stresses to calculate the increase of the endurance limit of surface-hardened specimens and parts with stress concentrators due to compressive residual stresses.

Stress concentrator; non-propagating fatigue crack; linear fracture mechanics; stress intensity coefficient; cylindrical specimen; finite-element modeling; endurance limit.

Citation: Sazanov V.P. Analysis of the mechanism of fatigue crack arrest in a cylindrical notched specimen. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 1. P. 160-169. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-160-169

References

1. Kudryavtsev P.I. *Nerasprostranyayushchiesya ustalostnye treshchiny* [Nonpropagating fatigue cracks]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1982. 174 p.
2. Kudryavtsev P.I., Morozova T.I. *Razvitie ustalostnykh treshchin v stalyakh v svyazi s poverkhnostnym naklepom. Sb. statey «Issledovaniya po uprochneniyu detaley mashin»*. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1972. P. 194-200. (In Russ.)
3. Kudryavtsev P.I. *Nekotorye osobennosti stroeniya treshchin ustalosti v nizkouglerodistoy stali. V sb. «Povyshenie prochnosti i dolgovechnosti detaley mashin»*. No. 110. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1969. P. 105-113. (In Russ.)
4. Troshchenko V.T., Pokrovskiy V.V., Prokopenko A.V. *Treshchinostoykost' metallov pri tsiklicheskom nagruzhении* [Crack resistance of metals under cyclic loading]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1987. 256 p.
5. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vakulyuk V.S. *Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detaley po ostatochnym napryazheniyam* [Prediction of fatigue strength of surface hardened components by residual stresses]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2012. 125 p.
6. Pavlov V.F. Influence of a value and a distribution of residual stresses in the surface layer of a part with a concentrator on the endurance limit. Report 1. Solid parts. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 1988. No. 8. P. 22-26. (In Russ.)

7. Pavlov V.F. The influence of a value and a distribution of residual stresses in the surface layer of a part with a concentrator on the endurance limit. Report II. Hollow parts. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 1988. No. 12. P. 37-40. (In Russ.)

8. Chirkov A.V., Sazanov V.P., Samoylov V.A., Larionova Y.S. Modeling of redistribution of residual stresses in the cylindrical specimens after advancing surface plastic forming. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2011. No. 3 (27), part 3. P. 171-174. (In Russ.)

9. Ivanov S.I. K opredeleniyu ostatochnykh napryazheniy v tsilindre metodom kolets i polosok. *Sb. trudov «Ostatochnye napryazheniya»*. Iss. 53. Kuibyshev: Kuibyshev Aviation Institute Publ., 1971. P. 32-42. (In Russ.)

10. Kirpichyov V.A, Sazanov V.P., Surgutanov N.A., Shadrin V.K. On the connection between the stresses intensity coefficient and non-propagating crack critical depth. *Proceedings of the Tenth Russian Conference on Solid Mechanics*. V. 2. Samara: Samara State Technical University Publ., 2017. P. 23-26. (In Russ.)

11. Broek D. Elementary engineering fracture mechanics. Leyden, 1974.