

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

Materials mechanics: strength, durability, safety

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-11-46-54>

ЛОКАЛЬНОЕ ИНДЕНТИРОВАНИЕ КАК СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ СКОРОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ

© Александр Андреевич Федоров, Игорь Александрович Разумовский*, Юрий Григорьевич Матвиенко

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4;
*e-mail: murza45@gmail.com

*Статья поступила 1 апреля 2022 г. Поступила после доработки 25 мая 2022 г.
Принята к публикации 29 июня 2022 г.*

Исследована возможность существенного уменьшения скорости роста усталостной трещины путем создания в окрестности ее вершины локального поля остаточных напряжений, возникающих вследствие внедрения сферического индентора. Разработаны методика и алгоритм программы (в ПК ANSYS) для численного моделирования в трехмерной постановке процесса усталостного роста трещины в поле остаточных напряжений. С учетом перспектив развития методики применительно к использованию динамического индентирования в макросе использован решатель ANSYS Explicit STR, полностью интегрированный в расчетный модуль. На первом этапе расчета программа позволяет на основе решения упругопластической задачи определять поля остаточных напряжений (ОН), возникающих при индентировании окрестности вершины трещины исследуемого объекта; на втором этапе — проводить численное моделирование процесса усталостного роста трещины. Рассмотрены вопросы влияния параметров индентирования (величины усилия, приложенного к индентору, зоны локализации точки индентирования, условий закрепления) на скорость роста трещины. Обоснованы способы существенного уменьшения скорости роста трещины, основанные на многократном предварительном индентировании. С использованием разработанной программы решена серия задач о влиянии различных типов нагружений и закреплений на скорость роста усталостной трещины в пластине со сквозной трещиной. Показано, что для создания в окрестности вершины трещины поля остаточных напряжений, обеспечивающих существенное снижение скорости роста трещины, можно использовать одностороннее индентирование установленных на опорную поверхность тонкостенных объектов с трещинами, что существенно упрощает практическое применение методики. Установлено, что при многократном индентировании вдоль линии распространения трещины скорость роста усталостной трещины существенно ниже, чем при использовании единственного индентора.

Ключевые слова: усталостный рост трещины; остаточные напряжения; индентирование; численное моделирование.

LOCAL INDENTATION AS METHOD OF REDUCING FATIGUE CRACK GROWTH RATE

© Alexandr A. Fedorov*, Igor A. Razumovskii, Yuri G. Matvienko

Mechanical Engineering Research Institute of RAS, 4, Maly Kharitonievskii per., Moscow, 101990, Russia;
*e-mail: murza45@gmail.com

Received April 1, 2022. Revised May 25, 2022. Accepted June 29, 2022.

The possibility of a significant decrease in the growth rate of a fatigue crack is studied. The goal can be attained by creating a local field of residual stresses near the crack tip which arises due to the indentation of a spherical indenter. A methodology and program algorithm (in ANSYS) have been developed for numerical simulation of the problem in a three-dimensional formulation of the process of fatigue crack growth in the field of residual stresses. Considering the prospects of developing the technique with regard to the use of dynamic indentation, the ANSYS Explicit STR solver fully integrated into the calculation module was used in the macro. Proceeding from the solution of the elastoplastic problem the program provides determination of the fields of residual stresses (RS) at the first stage of the calculation and numerical simulation of the fatigue crack growth on the second stage. The effect of the indentation parameters (magnitude

of the force applied to the indenter and the location of the indentation point, conditions of fixing) on the crack growth rate is considered. Methods for a significant reduction in the crack growth rate based on multiple preliminary indentation are substantiated. Using the developed program, we managed to solve a series of problems regarding the effect of different types of loading and fastenings on the growth rate of a fatigue crack in a plate with a through crack. The use of one-sided indentation of thin-walled objects with cracks, which are installed on the support surface, greatly simplifies the practical application of the technique for creating a residual stress field in the vicinity of the crack tip. It is shown that with multiple indentation along the crack propagation line, the fatigue crack growth rate is significantly lower than that when using a single indenter.

Keywords: fatigue crack growth; residual stresses; indentation; numerical simulation.

Введение

Локальное индентирование с регистрацией зависимости от нагрузки перемещения индентора или размера и формы пятна контакта после разгрузки получило признание как эффективный метод оценки механических характеристик материала (твердости, модуля упругости, предела текучести, временного сопротивления и др.) как в лабораторных, так и натурных условиях [1 – 11]. Причем можно применять и динамическое (кинематическое) индентирование [1, 9, 11].

В ряде публикаций на основе результатов экспериментальных исследований показано, что индентирование зоны вершины трещины сферическим индентором [12, 13] или кольцевым пуассоном [14] может привести к существенному (в несколько раз) снижению скорости роста трещины при циклических нагрузках вследствие влияния поля возникающих остаточных напряжений (ОН). С учетом данного обстоятельства представляет практический интерес разработка программы для численного моделирования, которое позволит выбирать оптимальные параметры индентирования (размеры индентора, усилие индентирования P или возникающие вследствие индентирования максимальные остаточные перемещения $w_{\text{ост}}^{\text{max}}$, а также зоны локализации точки индентирования) в зависимости от механических характеристик материала и геометрии исследуемого объекта, а также уровня и характера усталостного нагружения. Программа должна включать два основных блока: программу, предназначенную для расчета трехмерного поля остаточных напряжений (ОН) в исследуемом объекте с трещиной, возникающего вследствие внедрения индентора; программу расчета усталостного роста пространственной трещины под действием циклической нагрузки.

В статье изложены основные положения разработанной программы, позволяющей проводить расчеты соответствующих задач как при симметричном, так и несимметричном относительно поверхностей плоской пространственной трещины расположении точек локализации индентора. Очевидно, что во втором случае индентирование будет приводить к повороту траектории развития трещины. Приведены примеры применения про-

граммы для оценки возможностей использования локального индентирования для управления процессом развития усталостной трещины.

Методика и алгоритмы программы (в среде ANSYS) для численного моделирования усталостного роста трещины

Для численного моделирования влияния локального индентирования на процесс циклического роста трещины разработан специализированный макрос в программном комплексе (ПК) ANSYS. С учетом перспектив развития методики применительно к динамическому индентированию в макросе использован решатель ANSYS Explicit STR, полностью интегрированный в унифицированный расчетный модуль Workbench Mechanical. На первом этапе расчета макрос позволяет определять поля остаточных напряжений (ОН), возникающих при индентировании окрестности вершины трещины исследуемого объекта, на втором этапе — проводить численное моделирование процесса усталостного роста трещины. При «соединении» указанных двух расчетов они объединяются в один, в котором существуют общие разделы — Mesh (КЭ-сетка), Fracture (трещины) и др.

Расчет полей остаточных напряжений. Рассмотрена задача о статическом внедрении сферического индентора в вершину трещины в плоском образце для испытаний на усталостную трещиностойкость (или в точку, расположенную в непосредственной близости от вершины). Исследованы два варианта граничных условий для второй поверхности образца: 1) двухстороннее индентирование поверхностей образца двумя одинаковыми инденторами; 2) поверхность пластины свободно оперта на массивную плиту, причем трение между поверхностями образца и опорной плиты отсутствует. Очевидно, что в последнем случае практическая реализация процедуры индентирования значительно проще, однако очевидно, что при необходимости и двухстороннее индентирование может быть осуществлено с использованием специального приспособления, представляющего собой массивную плиту с полусферическим выступом — аналогом индентора.

В качестве индентора рассматривали упругий стальной шарик из конструкционной стали (модуль упругости $E_n = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu_n = 0,3$) диаметром 5 мм. При расчетах ОН в зоне вершины трещины (в модельных задачах рассматривали случаи, когда индентирование осуществляется в вершину трещины или в непосредственной близости от нее) считали, что взаимодействие берегов трещины можно описать как трение их поверхностей.

Материал модельных объектов — конструкционная сталь S355NL (нормализованная) со следующими механическими характеристиками: минимальный предел текучести 355 МПа; предел прочности $\sigma_b = 470 - 630$ МПа [15] (при расчетах принимали $\sigma_b = 550$ МПа); плотность — 7850 кг/м³; модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; касательный модуль $E_k = 1450$ МПа. Диаграмма упругопластического деформирования стали хорошо описывается билинейной функцией, а коэффициент трения скольжения пары сталь — сталь $k = 0,5$ [16]. Ближайшим отечественным аналогом рассматриваемого материала является конструкционная низколегированная сталь 15ГФ, которая используется для изготовления сварных конструкций, эксплуатируемых в тяжелых условиях (мосты, опоры, вагоны и пр.).

Практическая реализация поставленной задачи в принятой постановке не представляет принципиальных трудностей.

Численное моделирование усталостного роста трещины. При использовании модуля Workbench необходимо передавать результаты выполненных на определенном этапе исследований (в нашем случае — результатов расчета полей ОН, обусловленных индентированием) в другой — последующий расчет усталостного роста трещины. Поэтому оба расчета должны быть проведены при одинаковом сеточном разбиении исследуемого объекта. С учетом этого применяемый в работе алгоритм моделирования процесса циклического роста трещины в поле ОН обеспечивает возможность автоматического перестроения сетки. При увеличении размеров окружающих фронт трещины контуров, используемых при вычислении КИН или J-интеграла, возрастает количество КЭ, для которых реализуется указанное перестроение. Это в свою очередь приводит к увеличению времени расчета.

При отсутствии поворота траектории усталостной трещины использовали уравнение Пэриса

$$da/dN = C(\Delta K_I)^m, \quad (1)$$

где a — длина трещины; N — количество циклов нагружения; ΔK_I — размах коэффициента интенсивности напряжений нормального отрыва; C ,

m — параметры, характеризующие свойства материала. Для стали S355NL эти параметры имеют следующие значения: $C = 1,15 \cdot 10^{-12}$ м/(МПа $\cdot \sqrt{м}$); $m = 3,19$ [17].

Коэффициент асимметрии цикла нагружения можно представить в виде

$$R = K_I^{\min} / K_I^{\max},$$

где K_I^{\min} и K_I^{\max} — минимальное и максимальное значения коэффициента интенсивности напряжений ($R < 1$).

При комбинированном нагружении зоны вершины трещины эквивалентная величина коэффициента интенсивности напряжений определяется как [18]

$$\Delta K_{\text{eqv}} = \frac{1}{2} \cos \frac{\theta}{2} [\Delta K_I (1 + \cos \theta) - 3 \Delta K_{II} \sin \theta], \quad (2)$$

где θ — угол между направлениями роста трещины и исходным направлением; K_{II} — коэффициент интенсивности напряжений поперечного сдвига;

$$\begin{aligned} \Delta K_I &= K_I^{\max} - K_I^{\min} = (1 - R)K_I^{\max}, \\ \Delta K_{II} &= K_{II}^{\max} - K_{II}^{\min} = (1 - R)K_{II}^{\max}. \end{aligned} \quad (3)$$

При комбинированном нагружении приращение длины трещины ds рассчитывают путем подсчета длин разделившихся («открытых») конечных элементов (КЭ), описывающих контур или поверхности берегов трещины в зоне ее вершины (рис. 1). Для плоской задачи изменение длины трещины представляет собой сумму длин открытых КЭ, принадлежащих берегам трещины (рис. 1, а), а для пространственной — характеризуется изменением положения каждого узла фронта трещины и является суммой изменения длин КЭ, которые расположены в направлении ее приращения $\Delta s = \Sigma \Delta s_i$ (рис. 1, б).

Угол поворота усталостной трещины определяли по критерию максимальных тангенциальных напряжений у вершины трещины:

$$\begin{aligned} \theta &= \\ &= \cos^{-1} \frac{3(K_{II}^{\max})^2 + (K_I^{\max})\sqrt{(K_I^{\max})^2 + 8(K_{II}^{\max})^2}}{(K_I^{\max})^2 + 9(K_{II}^{\max})^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Величины коэффициентов интенсивности напряжений K_I и K_{II} определяли через интеграл взаимодействия [18]

$$I_0 = -\frac{\int_V q_{i,j} [\sigma_{kl} \varepsilon_{kl}^{aux} \delta_{ij} - \sigma_{kj}^{aux} u_{k,j} - \sigma_{kj}^{aux} u_{k,i}] dV}{\int_V \delta q_n dS}, \quad (5)$$

где σ_{ij} , ε_{ij} , u_i — компоненты напряжений, деформаций и перемещений соответственно; σ_{ij}^{aux} , ε_{ij}^{aux} ,

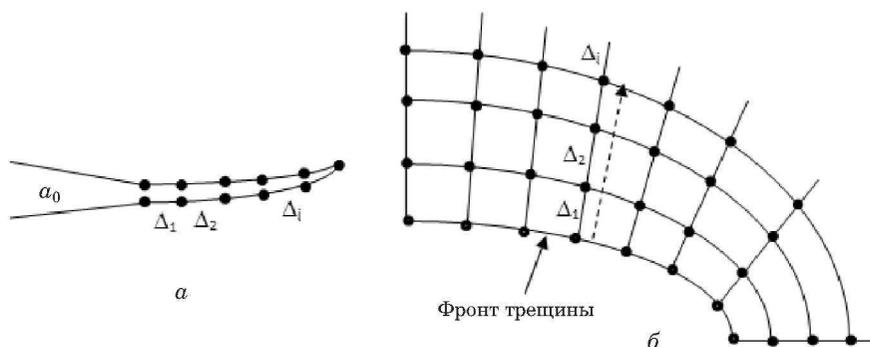


Рис. 1. Схема приращения длины трещины для плоской (а) и пространственной (б) задач

Fig. 1. Scheme of the crack length increment for plane (a) and spatial (b) problems

u_i^{aux} — компоненты напряжений, деформаций и перемещений соответственно вспомогательного поля; q_i — компоненты вектора приращений.

На рис. 2 показана схема программы для численного моделирования процесса усталостного роста трещины с учетом влияния ОН, обусловленных индентированием. Синие линии означают то, что данные из первого расчета (расчета пространственного поля ОН) передаются во второй (моделирование роста трещины). Используемые модели материалов (*Engineering Data*), геометрия (*Geometry*), т.е. образец и инденторы, а также модель решения (*Model*), куда входят настройки сетки, контактов, системы координат и пр., являются общими для обоих расчетов.

Алгоритм программы разработан таким образом, что для расчета циклического роста трещины в поле остаточных напряжений не имеет значения то, каким образом выполнен расчет ОН. Поэтому все представленные ниже результаты, полученные при создании поля ОН путем статического индентирования, могут быть распространены на случай динамического индентирования.

Объект исследования

В качестве объекта исследования рассматривали пластину неограниченных размеров с плоской сквозной внутренней трещиной, находящуюся в условиях двухосного растяжения. В целях увеличения зоны влияния индентирования на скорость усталостного роста трещины принята относительно небольшая толщина образца $h = 2$ мм. К границам пластины приложены нормальные напряжения σ_y , действующие перпендикулярно направлению развития трещины. Эскиз исследуемого объекта, схемы его нагружения и КЭ-разбиения (для случая симметричного расположения точки индентирования D), а также расположения индентора представлены на рис. 3. На рис. 3, в, г показан случай, когда точка индентирования смещена на величину Δy^* относительно плоскости симметрии образца (x^* , y^* — ло-

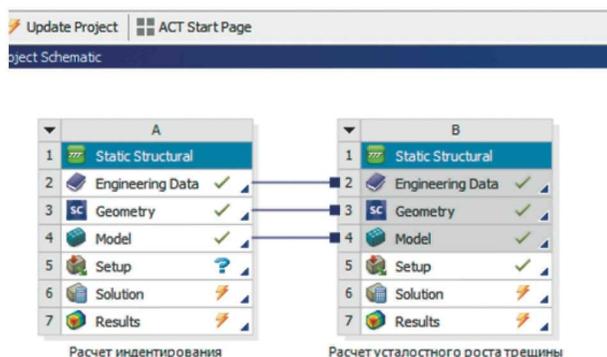


Рис. 2. Схема расчета усталостного роста трещины с учётом влияния пластических деформаций, обусловленных индентированием

Fig. 2. Scheme for calculating the fatigue crack growth, taking into account the plastic deformations attributed to indentation

кальные декартовы координаты, связанные с вершиной трещины).

Ниже приведем результаты расчетов модельных задач, позволяющих оценить возможность управления процессом роста усталостной трещины с помощью индентирования.

Индентирование единственным индентором

В работе [16] приведены результаты расчетного моделирования влияния локального индентирования на усталостный рост трещины в рассматриваемом объекте — компактном образце. При этом рассмотрен случай, когда поле ОН в зоне вершины трещины создается двумя сферическими инденторами (двухстороннее индентирование) и является симметричным относительно срединной плоскости образца.

В данной работе предложен вариант, когда в процессе индентирования образец опирается на массивную плиту (одностороннее индентирова-

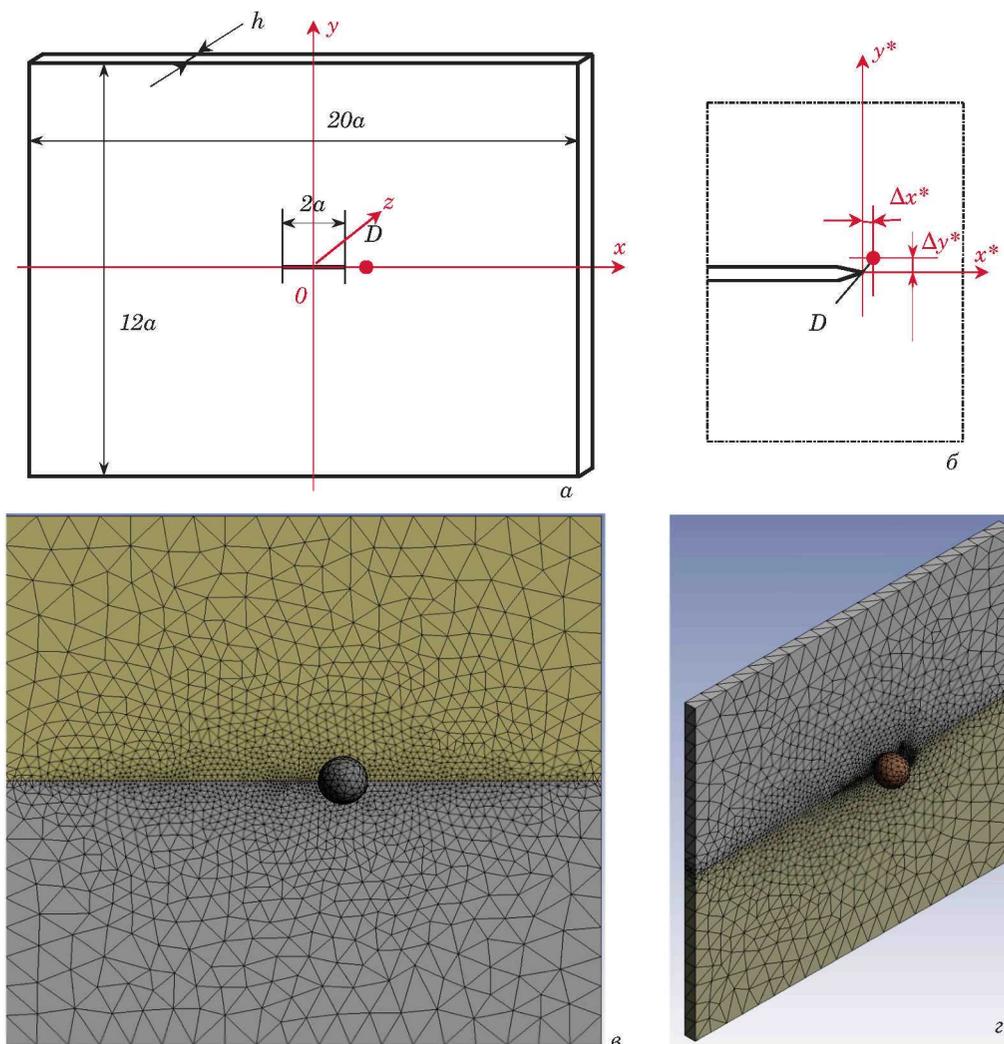


Рис. 3. Пластина с внутренней трещиной: *a* — схема исследуемого объекта; *b* — зона вершины трещины; *c, d* — схема КЭ-разбиения

Fig. 3. Plate with an internal crack: *a* — scheme of the object under study; *b* — crack tip zone; *c, d* — FE partition scheme

ние). Очевидно, что в этом случае процедура индентирования реализуется значительно проще.

На рис. 4 приведены расчетные зависимости приращений длины трещины от числа циклов нагружения, полученные для двухстороннего (*a*) и одностороннего (*b*) индентирования пластины, опертой на массивную плиту при заданных величинах максимальных остаточных перемещений $w_{\text{ост}}^{\text{max}}$ и размаха циклической нагрузки σ_y . При этом показаны кривые, соответствующие перемещениям точек фронта трещины, соответствующих поверхности индентирования ($z = 0$), средней поверхности ($z = 1$), а также поверхности ($z = 2$), которая в первом случае является поверхностью индентирования, а во втором — опорной поверхностью.

Индентирование осуществляли в вершину трещины ($\Delta x^* = \Delta y^* = 0$). При этом во втором случае величины максимального перемещения

индентора при индентировании w^p , а следовательно, и максимальных остаточных перемещений $w_{\text{ост}}^{\text{max}}$ почти в два раза больше, чем в первом случае.

Из рис. 4 следует, что одностороннее индентирование может быть столь же эффективным способом снижения скорости роста усталостной трещины, что и технически более сложно реализуемое двухстороннее индентирование.

Многokrатное индентирование по линии роста трещины

Можно полагать, что в случае разрушения по первому типу ($K_{II} = 0$) для усиления эффекта снижения скорости усталостной трещины целесообразно выполнить индентирование в ряде точек, расположенных на линии симметрии об-

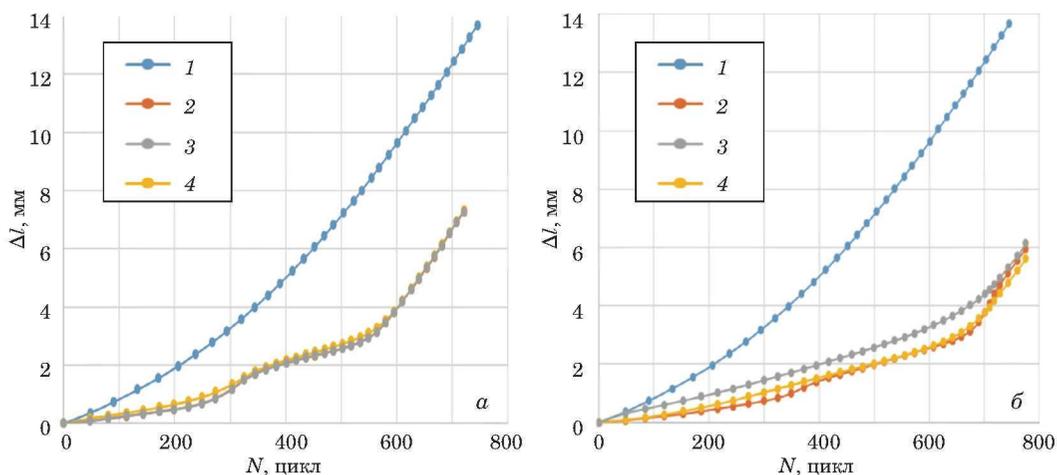


Рис. 4. Кривые роста трещины при двухстороннем (а) и одностороннем (б) индентировании: а — $w^p = 60$ мкм, $w_{\text{ост}}^{\text{max}} = 53$ мкм, $\sigma_y = 560$ МПа; б — $w^p = 120$ мкм, $w_{\text{ост}}^{\text{max}} = 107$ мкм, $\sigma_y = 560$ МПа; 1 — без индентирования, 2 — поверхность индентирования, 3 — опорная поверхность, 4 — срединная поверхность

Fig. 4. Crack growth curves for two-sided (a) and one-sided (b) indentation: a — double-sided indentation, $w^p = 60$ μm , $w_{\text{rest}}^{\text{max}} = 53$ μm , $\sigma_y = 560$ МПа; b — one-sided indentation, $w^p = 120$ μm , $w_{\text{rest}}^{\text{max}} = 107$ μm , $\sigma_y = 560$ МПа; 1 — without indentation; 2 — indentation surface; 3 — support surface; 4 — middle surface

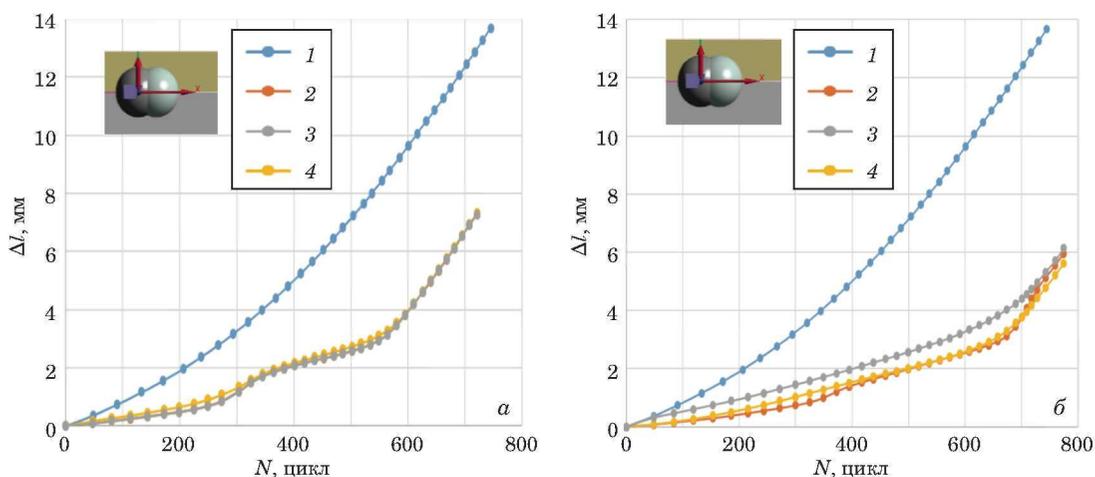


Рис. 5. Кривые роста трещины при двухстороннем (а) и одностороннем (б) индентировании двумя сферическими инденторами: а — $w^p = 60$ мкм, $w_{\text{ост}}^{\text{max}} = 53$ мкм, $\sigma_y = 630$ МПа; б — $w^p = 120$ мкм, $w_{\text{ост}}^{\text{max}} = 107$ мкм, $\sigma_y = 630$ МПа (1 – 4 — то же, что на рис. 4)

Fig. 5. Crack growth curves for double-sided and single-sided indentation with two spherical indenters: a — double-sided indentation, $w^p = 60$ μm , $w_{\text{rest}}^{\text{max}} = 53$ μm , $\sigma_y = 630$ МПа; b — one-sided indentation, $w^p = 120$ μm ; $w_{\text{rest}}^{\text{max}} = 107$ μm , $\sigma_y = 630$ МПа

разца ($x = 0$) и некотором расстоянии друг от друга Δl .

На рис. 5 показаны кривые роста трещины для случаев двухстороннего (а) и одностороннего (б) индентирования двумя сферическими инденторами: при этом точка локализации первого индентора соответствует вершине трещины ($\Delta x^* = \Delta y^* = 0$), а второй индентор смещен на 2 мм ($\Delta x^* = 2$ мм, $\Delta y^* = 0$). Как и ранее, во втором случае величины максимального перемещения обоих инденторов w^p , а также максимальных остаточных перемещений $w_{\text{ост}}^{\text{max}}$ почти в два раза больше, чем в первом случае.

На рис. 6 приведены кривые роста трещины для случаев одностороннего и одновременного индентирования тремя одинаковыми сферическими инденторами, расположенными с шагом 2 мм; при этом зона локализации — вершина трещины.

Сравнение результатов, представленных на рис. 5 и 6, показывает, что одновременное индентирование несколькими инденторами позволяет существенно (в несколько раз) уменьшить скорость роста циклической трещины. Очевидно, что, варьируя величинами усилий индентирования и расстояниями между инденторами, можно

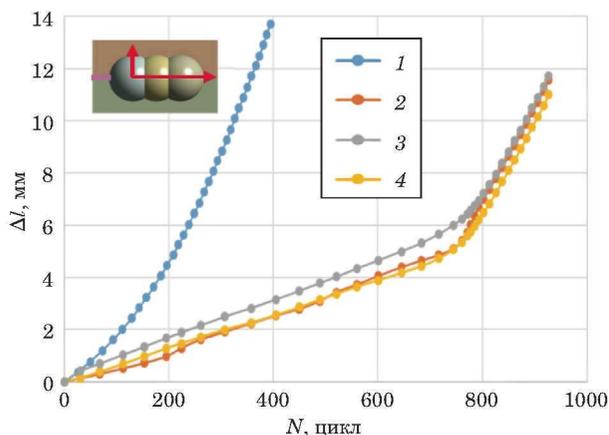


Рис. 6. Кривая роста трещины при одностороннем индентировании тремя сферическими инденторами: $w^p = 120$ мкм, $w_{\text{ост}}^{\text{max}} = 107$ мкм, $\sigma_y = 750$ МПа (1–4 — то же, что на рис. 4 и 5)

Fig. 6. Crack growth curve for single sided indentation with three spherical indenters ($w^p = 120$ μm , $w_{\text{rest}}^{\text{max}} = 107$ μm , $\sigma_y = 750$ MPa)

для конкретных параметров рассматриваемой практической задачи достичь еще более значительного эффекта снижения скорости роста трещины.

«Пилообразное» индентирование

В работе [19] рассмотрен процесс роста усталостной трещины в компактном образце. Показано, что при смещении точки индентирования D (см. рис. 3) относительно линии развития трещины нормального отрыва на величину Δy направление дальнейшего развития трещины изменяется. Таким образом можно управлять траекторией трещины. Данное обстоятельство позволяет заключить, что многократное индентирование, при котором точки индентирования D на каждом шаге Δl последовательно смещаются вправо или влево от исходной траектории, может существенно уменьшить скорость развития трещины. Заметим также, что решение задачи в данной постановке требует оценки точности локализации точки индентирования.

В этом случае для расчетов модельной задачи следует использовать решение задачи при комбинированном нагружении зоны вершины трещины с использованием соотношений (2) – (5). Очевидно, что трещина перестает быть прямолинейной и на каждом последующем шаге отклоняется от прямой в ту или иную сторону. При этом за условную длину принимается проекция траектории трещины на ось x .

На рис. 7 представлены результаты расчетов серии задач для многоточечного «пилообразного» одностороннего индентирования рассматриваемого образца при следующих параметрах ло-

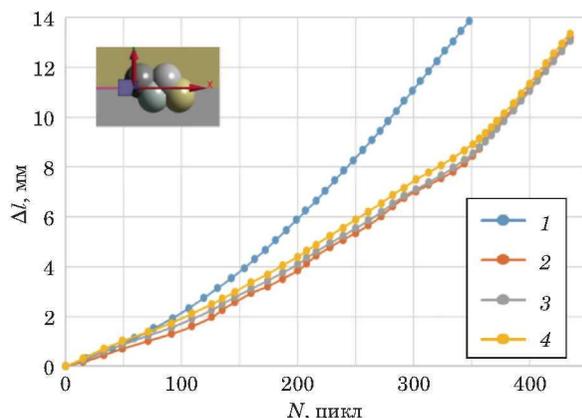


Рис. 7. Кривая роста трещины при одностороннем «пилообразном» индентировании четырьмя сферическими инденторами ($w^p = 120$ мкм, $w_{\text{ост}}^{\text{max}} = 107$ мкм, $\sigma_y = 750$ МПа)

Fig. 7. Crack growth curve for single-sided “saw tooth” indentation with four spherical indenters ($w^p = 120$ μm , $w_{\text{rest}}^{\text{max}} = 107$ μm , $\sigma_y = 750$ MPa)

кализации индентора: $\Delta l = 2$ мм, отступ от линии симметрии $\Delta y = \pm 1$ мм. Количество инденторов — четыре. Величины параметров задачи: $w^p = 120$ мкм, $w_{\text{ост}}^{\text{max}} = 107$ мкм, $\sigma_y = 750$ МПа.

Результаты расчета показали, что эффект снижения скорости роста трещины при «пилообразном» индентировании при принятых параметрах задачи ниже, чем при многократном индентировании по линии роста трещины (см. рис. 6). В данном случае, с одной стороны, смещение точки локализации фронта трещины должно приводить к снижению скорости развития трещины из-за поворота ее траектории, с другой — происходит уменьшение уровня ОН, обусловленных индентированием (при той же величине усилия P). Следует ожидать, что при варьировании параметров задачи можно добиться значительного эффекта снижения скорости роста трещины путем «пилообразного» индентирования.

Заключение

1. Разработан параметрический макрос (в среде ANSYS), реализующий методику и алгоритм программы для численного моделирования усталостного роста трещины в поле ОН, возникающих при индентировании поверхности исследуемого трехмерного объекта. На первом этапе расчета он позволяет определять поля ОН, возникающих при индентировании окрестности вершины трещины; на втором этапе — проводить численное моделирование процесса усталостного роста трещины.

2. С использованием разработанной программы выполнена серия расчетов задач о влиянии

на скорость роста усталостной трещины различных типов нагружения (двухстороннее, одностороннее индентирование).

3. Для создания в окрестности вершины трещины поля остаточных напряжений, обеспечивающих существенное снижение скорости роста трещины, можно использовать одностороннее индентирование установленных на опорную поверхность тонкостенных объектов с трещинами, что существенно упрощает практическое применение методики.

4. Многократное индентирование вдоль линии распространения трещины может обеспечить большее снижение скорости роста усталостной трещины, чем однократное — единственным индентором.

5. Разработанные методика и программа позволяют на основе численного моделирования конкретной практической задачи определять оптимальные параметры индентирования (силу индентирования, зону локализации, количество и расположение инденторов) в зависимости от геометрии исследуемого объекта, параметров нагружения, механических характеристик материала.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-19-00351.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев Р. А., Литовченко В. Н., Дубинский В. Н. Исследование твердости и модуля упругости феррита методом кинетического индентирования / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 5. С. 55 – 60.
2. Матюнин В. М., Терентьев В. Ф., Марченков А. Ю., Слизов А. К. Методика определения твердости и других механических свойств тонколистовой трип-стали индентированием / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 7. С. 49 – 53.
3. Рудницкий В. А., Крень А. П., Ланцман Г. А. Определение предела текучести металлов методом микроударного индентирования сферическим бойком / Дефектоскопия. 2019. № 2. С. 61 – 66.
4. Ляцунова Е. А., Чудинов В. В., Уваров С. В. Динамическое индентирование керамики из оксида алюминия / Физика. 2016. № 3(34). С. 59 – 64.
5. Kruzic J. J., Kim D. K., Koester K. J., Ritchie R. O. Indentation techniques for evaluating the fracture toughness of biomaterials and hard tissues / J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 2009. N 2. P. 384 – 395.
6. Барон А. А. Оценка трещиностойкости сталей методом индентирования / Известия волгоградского государственного технического университета. 2019. № 6(229). С. 69 – 73.
7. Коновалов Д. А., Голубкова И. А., Смирнов С. В. Определение прочностных свойств отдельных слоев деформированных слоистых композитов методом кинетического индентирования / Дефектоскопия. 2011. № 12. С. 91 – 98.
8. Чернятин А. С., Разумовский И. А. Метод индентирования как способ оценки нагруженности и деградации механических характеристик материала / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 4. С. 40 – 48.

9. Ильинский А. В., Федоров А. В., Степанова К. А. и др. Исследование динамической твердости конструкционных металлических материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 1. С. 57 – 61. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-1-57-61
10. Матюнин В. М., Марченков А. Ю., Волков П. В., Демидов А. Н. Диагностика механических свойств материалов по диаграммам индентирования на разных масштабных уровнях / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 4. С. 47 – 52.
11. Матюнин В. М., Марченков А. Ю., Абусаиф Н., Стасенко Н. А. Оценка упругой податливости твердомера при кинетическом индентировании материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 4. С. 57 – 63. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-4-57-63
12. Razavi S. M. J., Ayatollahi M. R., Amouzadi A., Berto F. Effects of different indentation methods on fatigue life extension of cracked specimens / FFEMS (Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures). 2017. N 41. P. 287 – 299.
13. Razavi S. M. J. A. M. R., F. B. Assessment of fatigue crack growth behavior of cracked specimens / Procedia Structural Integrity. 2018. N 13. P. 69 – 73.
14. Won-Kyun L., Jeong-Hoon S., Bhavavi V. S. Effect of ring indentation on fatigue crack growth in an aluminum plate / International Journal of Fatigue. 2003. N 25. P. 1271 – 1277.
15. DIN EN 10025-3-2019. Hot rolled products of structural steels. Part 3: Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels.
16. Deulin E. A., Mikhailov V. P., Panfilov Yu. V., Nevshupa R. A. Mechanics and Physics of Precise Vacuum Mechanisms. — Springer, 2010. P. 34.
17. Albuquerque C. M. C., Miranda R. M. C., Richter-Trummer V., de Figueredo M. A. V., Calcada R., de Castro P. M. S. T. Fatigue crack propagation behavior in thick steel weldments / Int J Struct Integr. 2012. N 3(2). P. 184 – 203.
18. ANSYS Inc. PDF Documentation for Release 2021 R1, Fracture Analysis Guide, January 2021.
19. Matvienko Y. G., Razumovskii I. A., Fedorov A. A. Numerical modeling the effect of static indentation on the rate and the fatigue crack growth trajectory / Journal of Physics: Conference Series. 22. Ser. “XXII Winter School on Continuous Media Mechanics, WSCMM 2021”. 2021. P. 012039.

REFERENCES

1. Vorob'ev R. A., Litovchenko V. N., Dubinskii V. N. Study of the Hardness and Modulus of Elasticity of Ferrite using Kinetic Indentation Method / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2016. Vol. 82. N 5. P. 55 – 60 [in Russian].
2. Matyunin V. M., Terent'ev V. F., Marchenkov A. Yu., Sli-zov A. K. Determination of Hardness and Other Mechanical Properties of Thin-sheet Trip Steels by Indentation / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 7. P. 49 – 53 [in Russian].
3. Rudnitskii V. A., Kren' A. P., Lantsman G. A. Determining yield strength of metals by microindentation with a spherical tip / Defektoskopiya. 2019. N 2. P. 61 – 66 [in Russian].
4. Lyapunova E. A., Chudinov V. V., Uvarov S. V. Dynamic indentation of alumina ceramics / Fizika. 2016. N 3(34). P. 59 – 64 [in Russian].
5. Kruzic J. J., Kim D. K., Koester K. J., Ritchie R. O. Indentation techniques for evaluating the fracture toughness of biomaterials and hard tissues / J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 2009. N 2. P. 384 – 395.
6. Baron A. A. Assessment of steels fracture toughness by means of indentation technics / Izv. Volgograd. Gos. Tekhn. Univ. 2019. N 6(229). P. 69 – 73 [in Russian].
7. Konovalov D. A., Golubkova I. A., Smirnov S. V. Determination of strength properties of individual layers of deformed layered composites by kinetic indentation / Defektoskopiya. 2011. N 12. P. 91 – 98 [in Russian].
8. Chernyatin A. S., Razumovskii I. A. The method of indentation as a way to assess the loading and degradation of the me-

- chanical characteristics of the material / Probl. Mashinostr. Nadezhn. Mashin. 2015. N 4. P. 40 – 48 [in Russian].
9. **Ilin'skiy A. V., Fedorov A. V., Stepanova K. A., et al.** Study of the dynamic hardness of structural metal materials / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2020. Vol. 86. N 1. P. 57 – 61 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-1-57-61
 10. **Matyunin V. M., Marchenkov A. Yu., Volkov P. V., Demidov A. N.** Diagnosis of the Mechanical Properties of Materials from the Indentation Diagrams at Different Scale Levels / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 4. P. 47 – 52 [in Russian].
 11. **Matyunin V. M., Marchenkov A. Yu., Abusaif N., Stasen'ko N. A.** Evaluation of the elastic compliance of the hardness tester in kinetic indentation tests / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2019. Vol. 85. N 4. P. 57 – 63 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-4-57-63
 12. **Razavi S. M. J., Ayatollahi M. R., Amouzadi A., Berto F.** Effects of different indentation methods on fatigue life extension of cracked specimens / FFEMS (Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures). 2017. N 41. P. 287 – 299.
 13. **Razavi S. M. J. A. M. R., F. B.** Assessment of fatigue crack growth behavior of cracked specimens / Procedia Structural Integrity. 2018. N 13. P. 69 – 73.
 14. **Won-Kyun L., Jeong-Hoon S., Bhavavi V. S.** Effect of ring indentation on fatigue crack growth in an aluminum plate / International Journal of Fatigue. 2003. N 25. P. 1271 – 1277.
 15. DIN EN 10025-3-2019. Hot rolled products of structural steels. Part 3: Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels.
 16. **Deulin E. A., Mikhailov V. P., Panfilov Yu. V., Nevshupa R. A.** Mechanics and Physics of Precise Vacuum Mechanisms. — Springer, 2010. P. 34.
 17. **Albuquerque C. M. C., Miranda R. M. C., Richter-Trummer V., de Figueredo M. A. V., Calcada R., de Castro P. M. S. T.** Fatigue crack propagation behavior in thick steel weldments / Int J Struct Integr. 2012. N 3(2). P. 184 – 203.
 18. ANSYS Inc. PDF Documentation for Release 2021 R1, Fracture Analysis Guide, January 2021.
 19. **Matvienko Y. G., Razumovskii I. A., Fedorov A. A.** Numerical modeling the effect of static indentation on the rate and the fatigue crack growth trajectory / Journal of Physics: Conference Series. 22. Ser. “XXII Winter School on Continuous Media Mechanics, WSCMM 2021”. 2021. P. 012039.