

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»**

**16+
ISSN 2071-6168**

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 2

**Тула
Издательство ТулГУ
2024**

4. Пафилов Е.А., Мамон Ю.И., Смыляев Д.В. Влияние блестящих точек на положение фазового центра протяжённого радиолокационного объекта // Труды российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, серия: научные сессии Тульской областной организации выпуск XXXVII. Тула: ТулГУ, 2019. С. 57-64.

5. Григорян Д.С., Лайко Е.А., Бушуев А.Ф., Торбин С.А. Принципы обратной моноимпульсной радиолокации в задачах построения помехоустойчивых и живучих систем самонаведения/ Вестник концерна ПВО "Алмаз – Антей. 2015. №1 (13).

Желонкин Дмитрий Васильевич, адъюнкт, dizhelonkin58l@yandex.ru, Россия, Пенза, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения,

Минаков Евгений Иванович, д-р техн. наук, профессор, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Тычков Александр Юрьевич, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, tychkov-a@mail.ru, Россия, Пенза, Пензенский государственный университет

ANALYSIS OF THE UNMASKING FEATURES OF ARMORED TARGETS IN THE RADAR RANGE

E.I. Minakov, A.Y. Tychkov, D.V. Zhelonkin

The analysis of the unmasking features of armored targets in the radar range is presented, which showed that the expansion of the feature space by attracting additional characteristics (optimal polarizations and descriptors) makes it possible to improve the information capabilities of the polarization compared with the option of using only relative polarization parameters.

Key words: scattered signal amplitude, fluctuation character, depolarization, analysis, signal.

Zhelonkin Dmitry Vasilyevich, adjunct, Dizhelonkin58l@yandex.ru, Russia, Penza, Branch of the Military Academy of Logistics,

Minakov Evgeny Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Russia, Tula, Tula State University,

Tychkov Alexander Yurievich, doctor of technical sciences, head of the department, tychkov-a@mail.ru, Russia, Penza, Penza State University

УДК 623.4

DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-68-69

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ В КОМПОЗИТНОЙ ГИЛЬЗЕ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ТРЕЩИНЫ В ОБЛАСТИ КОНТАКТА МАТЕРИАЛОВ

Д.В. Бакланов, Е.И. Минаков, А.С. Ишков

В данной статье изложена математическая модель расчета коэффициента интенсивности напряжения в композитной составной гильзе. Рассмотрена проблема трещинообразования в области контакта различных материалов композитной гильзы.

Ключевые слова: аппроксимирующий контур, сингулярность, деформация сдвига, критерий разрушения Ирвина.

В процессе быстрой деформации материала его механические свойства могут измениться по сравнению со свойствами, полученными при статических испытаниях. Для расчетов композиционной гильзы мы должны учитывать влияние скорости трещинообразования на свойства используемых материалов. Таким образом, в статье были изучены коэффициенты интенсивности напряжений в области трещинообразования.

Напряжения и деформации в непосредственной близости от вершины острой трещины пропорциональны

$\frac{K}{\sqrt{r}}$, где K – коэффициент интенсивности напряжений, r – расстояние данной точки от вершины. При этом

напряжение в вершине трещины имеет особенность вида $\frac{1}{\sqrt{r}}$ (корневую). Прямые методы определения коэффици-

ентов интенсивности напряжений методом конечных элементов используются для оценки напряжений или смещений в области вершины трещины. При этом очевидно, что точность результатов определения коэффициентов интенсивности напряжений с использованием метода конечных элементов зависит от того, насколько точно моделируется поле напряжений и деформаций в окрестности вершины трещины. Обычные элементы конечных элементов, построенные на основе представления поля смещений с использованием полиномов с целыми степенями, могут затруднять точное моделирование. Для устранения этой проблемы в сетку вводятся один или несколько специальных элементов, которые моделируют сингулярность напряжений. Таким образом, распределение смещений вдоль этой области определяется соответствующим выражением.

$$u_i = C_1 + C_2 \sqrt{r} + C_3 r. \quad (1)$$

Пусть $u_i(0), u_i(L/4), u_i(L)$ – компоненты перемещения узла в вершине трещины, промежуточного узла, сдвинутого на четверть длины стороны, и углового узла соответственно. Здесь L – длина стороны, расположенной вдоль луча с началом в вершине трещины, а координата r отсчитывается от вершины. Тогда константы в выражении для распределения перемещений могут быть записаны в виде

$$C_1 = u_i(0), C_2 = \frac{1}{\sqrt{L}} [4u_i(L/4) - u_i(L) - 3u_i(0)]. \quad (2)$$

$$C_3 = \frac{1}{L} [2u_i(L) + 2u_i(0) - 4u_i(L/4)]. \quad (3)$$

Величина C_1 отражает перемещение вершины трещины, C_2 – ту часть перемещения, которая соответствует асимптотике, C_3 – постоянную деформацию и вращение тела как целого. Приравнявая все члены и считая $u_i(0)$ равным нулю, получаем

$$K_1 = \frac{2G\sqrt{2\pi}}{F_i(\theta)\sqrt{L}} [4u_i(L/4) - u_i(L)]. \quad (4)$$

Часто используемым способом выбора функции перемещений в пределах элемента является задание их в параметрической форме с использованием координат $-1 \leq \xi, \eta \leq 1$ следующим образом:

$$u = \sum N_i(\xi, \eta) u_i, \quad (5)$$

где u – вектор перемещений в произвольной точке с компонентами по осям u_x, u_y ; u_i – перемещение узлов; N_i – интерполирующие функции формы.

Для линейного четырехугольного элемента функции формы равны

$$N_i(\xi, \eta) = \frac{1}{4} (1 - \xi \xi_i)(1 - \eta \eta_i), \quad (6)$$

где ξ_i, η_i – локальные координаты узлов. В этом случае перемещения есть линейные функции координат, а сам элемент называют линейным.

Эти функции использовались для описания формы трещины, которая проходит через границу между двумя средами – основным материалом и основанием гильзы. Конечнo-элементарная модель части составной композитной гильзы и наложенной сетки в месте контакта материала представлены на рис. 1.

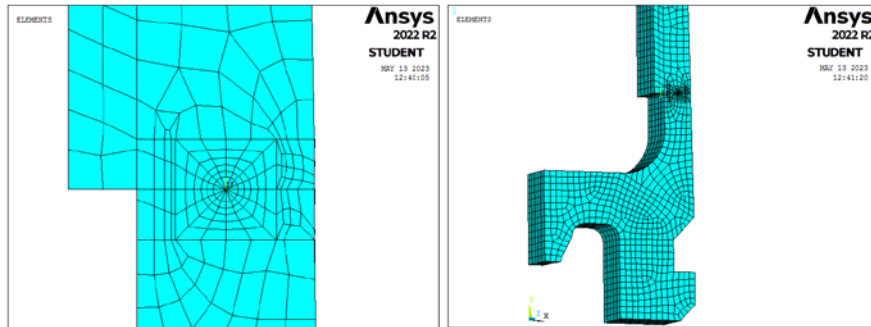


Рис. 1. Сетка у вершины трещины и на поверхности охватывающего квадрата

При проведении моделирования горения пороховых газов в полости композитной гильзы был сделан вывод что на контакте соединения двух материалов происходит сингулярность напряжений и соответственно повышается вероятность образования трещины и разрыва материала.

Совмещение двух соседних узлов четырехугольного элемента дает треугольный элемент, показанный на рис. 2. Для него распределение перемещений можно записать следующим образом

$$u = (1 - \rho)u_1 + \frac{1}{2}\rho(1 - \eta)u_2 + \frac{1}{2}\rho(1 + \eta)u_3, \quad (7)$$

где введено обозначение $\rho = \frac{1 + \xi}{2}$. Заменяя далее параметр координаты ρ на ρ^λ , получим (λ – степень асимптотики перемещений в окрестности вершины).

$$u = (1 - \rho^\lambda)u_1 + \frac{1}{2}\rho^\lambda(1 - \eta)u_2 + \frac{1}{2}\rho^\lambda(1 + \eta)u_3 = \quad (8)$$

$$u_1 + \frac{1}{2}\rho^\lambda(1 - \eta)(u_2 - u_1) + \frac{1}{2}\rho^\lambda(1 + \eta)(u_3 - u_1)$$

Для описания распределения перемещений в вершине трещины следует положить $\lambda = \frac{1}{2}$. При этом

$$u = u_1 + \frac{L_2(u_2 - u_1) + L_3(u_3 - u_1)}{\sqrt{L_2 + L_3}}. \quad (9)$$

Здесь так называемые L – координаты связаны с локальными координатами соотношениями

$$L_2 = \rho \frac{1-\eta}{2}, L_3 = \rho \frac{1+\eta}{2}. \quad (10)$$

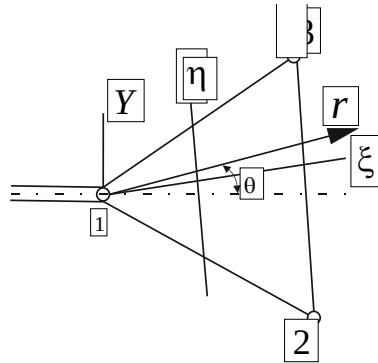


Рис. 2. Треугольный элемент

В общем случае роста трещины поток упругой энергии G в ее вершину может быть выражен следующей формулой

$$G = \frac{1-\nu}{2\mu} K_I^2 + \frac{1-\nu}{2\mu} K_{II}^2 + \frac{1}{2\mu} K_{III}^2 = \frac{1}{2} \int_0^{l^+} -\sigma_{ij} n_j^+ \frac{\partial u_i^+}{\partial l} dx + \frac{1}{2} \int_0^{l^-} -\sigma_{ij} n_j^- \frac{\partial u_i^-}{\partial l} dx. \quad (11)$$

Приток энергии в вершину трещины будет определяться через коэффициенты интенсивности напряжений

$$G = G_I + G_{II} = \frac{1}{E} \left[(K_I^{(1)} + K_I^{(2)})^2 + (K_{II}^{(1)} + K_{II}^{(2)})^2 \right]. \quad (12)$$

Траектория аппроксимирующего контура не обязательно проходит исключительно через узлы сингулярных элементов, так как выбор контура может быть достаточно произвольным. Для вычисления номеров узлов вводим параметры n_i, n_j, n_k , представленные на рис. 3.

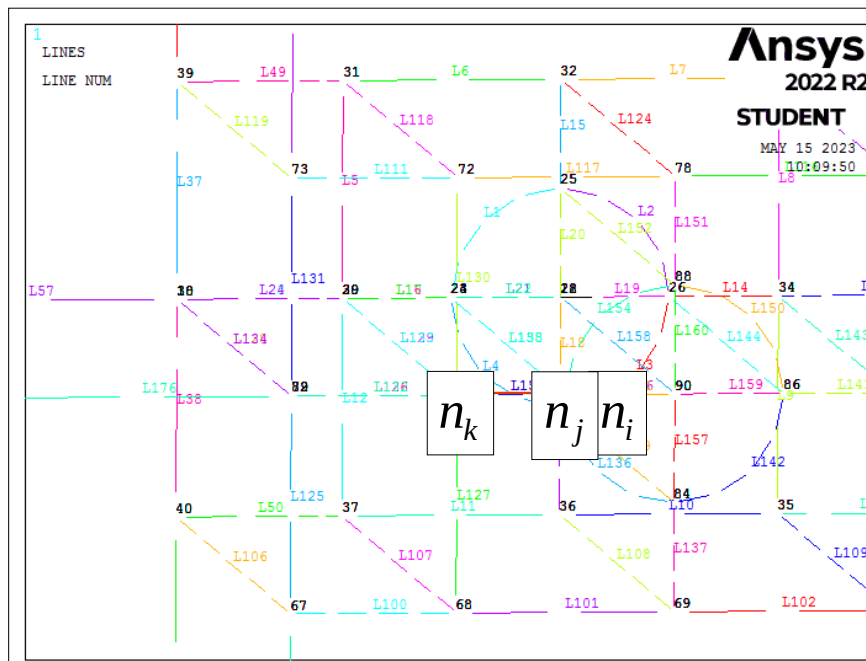


Рис. 3. Размещение параметров n_i, n_j, n_k на берегах трещины на стыке донной части и тела гильзы

Путем использования метода конечных элементов для вычисления значений напряжений и смещений в области близ вершины трещины, можно определить коэффициенты интенсивности напряжений K_I, K_{II}, K_{III} . Ясно, что для получения точных результатов необходимо использовать специальные сингулярные элементы. На рис. 4 представлены значения коэффициентов интенсивности напряжений по которым $K_I \neq 0$, а коэффициенты $K_{II}, K_{III} = 0$, как и должно быть для трещины отрыва. В данном случае $K_I = 0,17455E12$.

На рис. 5 представлен численный результат значений коэффициентов напряжений у стали и полиамида при их разрыве

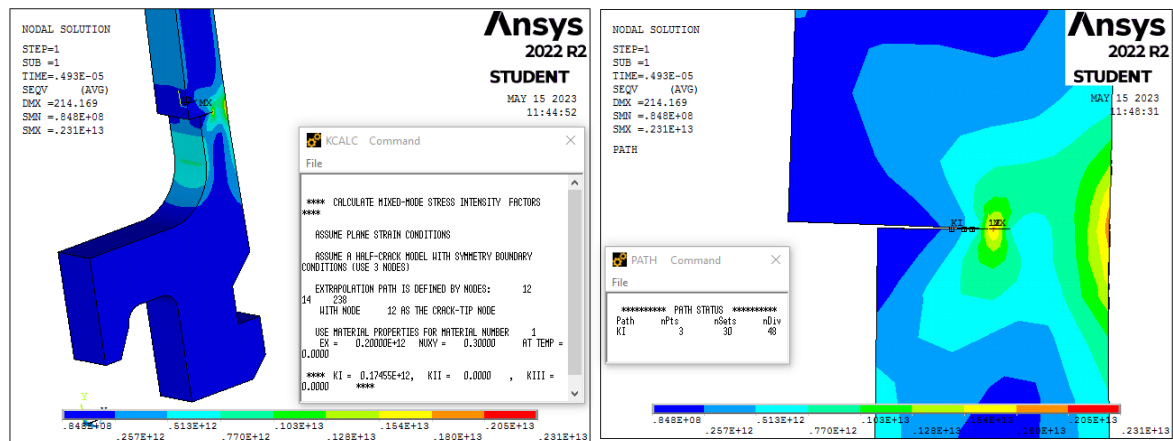


Рис. 4. Значения коэффициентов интенсивности напряжений в области разрыва трещины композитной составной гильзы

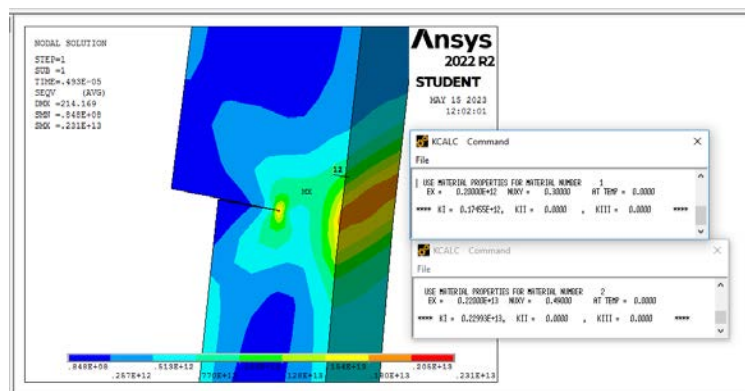


Рис. 5. Значения коэффициентов интенсивности напряжений в области разрыва трещины у стали и полиамида композитной составной гильзы

Коэффициент K_I означает симметричное деформирование. Материал сопротивляется разрыву и для того чтобы его преодолеть, коэффициент интенсивности напряжений должен достичь максимального значения, обозначаемого K_{IC} . В этом состоит критерий разрушения Ирвина $K_I \leq K_{IC}$.

Предельный (критический) коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} , этот параметр, известный как вязкость разрушения, является механической характеристикой материала, которая оценивает его способность противостоять распространению трещины при хрупком разрушении.

Коэффициент K_{II} отражает обратно симметричное нагружение относительно линии трещины; это трещина поперечного сдвига – деформация сдвига происходит поперек фронта трещины. Сопротивление материала такому виду деформации обозначено $K_{II} \leq K_{IIC}$, где K_{IIC} – вязкость разрушения для трещины второго типа.

Для трещины третьего типа, коэффициент K_{III} отражает обратно симметричное нагружение вдоль фронта трещины; это трещина продольного сдвига – деформация сдвига параллельна фронту трещины. Критерий разрушения запишется аналогично предыдущим $K_{III} \leq K_{IIIC}$, где K_{IIIC} – вязкость разрушения при продольном сдвиге. Касательные напряжения и эпюры главных напряжений полученных результатов представлены на рис. 6 и рис. 7.

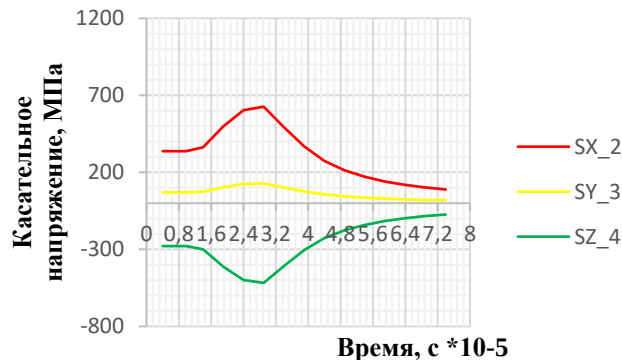


Рис. 6. Касательные напряжения

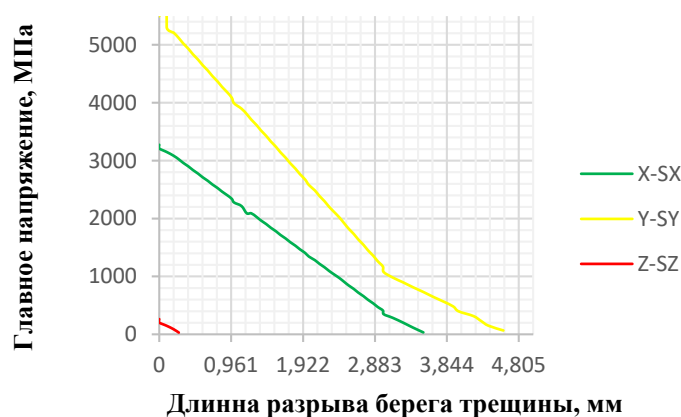


Рис. 7. Эпюры главных напряжений (Па) на продолжении трещины по оси симметрии: X-SX, Y-SY, Z-SZ

Выводы. Поскольку коэффициенты напряжений есть результат решения задач линейной теории упругости, то справедлив принцип суперпозиции. Это означает, что произвольную нагрузку можно представить в виде симметричной и обратно симметричных составляющих. Из этого следует, что численные методы по заранее созданным алгоритмам на основе определенных моделей отражают именно эту модель и не всегда способны гарантировать достоверность результатов.

Список литературы

1. Муйземнек А. Ю., Морозов Е. М., Шадский А.С. Ansys в руках инженера//Механика хрупкого разрушения. 2010. М.: ЛЕНАНД–456 с.
2. Плитов И. С., Полилов А. Н., Татусь Н. А. Компьютерное моделирование рациональной структуры криволинейного армирования профилированных композитных элементов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2013. №. 4. С. 73 – 79.
3. Дудченко А.А., Еллатьевский А.Н., Хворостинский А.И. Учебное пособие по проектированию и расчету тонкостенных конструкций из композиционных материалов. М.: МАИ, 1985 35 с.
4. Зиновьев П.А., Смердов А.А. Оптимальное проектирование композитных материалов: Учебное пособие по курсу «Проектирование композитных конструкций. Ч. II». М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 103 с.
5. Моссаковский П.А., Костырева Л.А. О новом способе экспериментального исследования материалов на динамический сдвиг при высокоскоростном деформировании. Проблемы прочности и пластичности, издательство ФГАОУ ВПО «ННГУ им. Н.И. Лобачевского» (Нижний Новгород), том 80, № 1, С. 127 – 135.
6. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том. 2. М.: Наука, 1970. 492 с.

Бакланов Дмитрий Владимирович, адъюнкт, baklanov90@yandex.ru, Россия, Пенза, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения (г. Пенза),

Минаков Евгений Иванович, д-р техн. наук, профессор, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ишков Антон Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, asihkov@mail.com, Россия, Пенза, Пензенский государственный университет

A MATHEMATICAL MODEL FOR COLCULATING THE STRESS INTENSITY COEFFICIENT IN A COMPOSITE SLEEVE DURING THE FORMATION OF A CRACK IN THE CONTACT AREA OF MATERIALS

D.V. Baklanov, E.I. Minakov, A.S. Ishkov

This article presents a mathematical model for calculating the stress intensity coefficient in a composite sleeve. The problem of cracking in the contact area of various materials of a composite sleeve is considered.

Key words: approximating contour, singularity, sovig deformation, the Irwin fracture criterions.

Baklanov Dmitry Vladimirovich, adjunct, baklanov90@yandex.ru, Russia, Penza, Branch of the Military Academy of Logistics (Penza),

Minakov Evgeny Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Russia, Tula, Tula State University,

Ishkov Anton Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, asihkov@mail.com, Russia, Penza, Penza State University