

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-АРМИРОВАННЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ****С.В. Шкаранова**shkaranovasv@student.bmstu.ru
SPIN-код: 5527-2824**МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация****Аннотация**

В настоящее время создание и актуализация методов неразрушающего контроля для композиционных материалов становятся все более популярными. В данной работе рассмотрен метод инструментального индентирования и особенности его применения к композитам. Выполнен численный расчет процесса индентирования по различным критериям прочности с использованием пакета программ Ansys. На основе полученных данных выделены две группы критериев по области разрушения материала. Данное разделение в дальнейшем поможет правильно подбирать критерии при выполнении расчетов контактной прочности и анализировать разрушение композиционных материалов при использовании метода инструментального индентирования.

Ключевые слова

Композиционные материалы, метод конечных элементов, теории прочности, метод инструментального индентирования, задача Герца, контактная прочность, эффективный модуль упругости, модели разрушения материала, углерод-углеродный композиционный материал

Поступила в редакцию 14.05.2021
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. В настоящее время композиционные материалы (КМ) широко применяются во многих отраслях, таких как ракетостроение, авиация, атомная промышленность и медицина. Это произошло благодаря возможности создания изделий с прогнозируемыми деформационными и прочностными характеристиками с помощью различных комбинаций компонентов и схем армирования. К изделиям, изготовленным из КМ, предъявляют высокие требования по соответствию их характеристик установленным значениям из-за высокой стоимости оборудования и сырья. На данный момент существует множество методов контроля физико-механических характеристик КМ, однако все они являются либо разрушающими, либо предполагают изготовление специальных образцов.

Отметим, что механические свойства пространственно-армированных КМ определяются не только свойствами их компонентов, но также зависят от степени их взаимодействия. Поэтому наиболее сложной и наименее проработанной задачей считается измерение локальных физико-механических свойств изделий из пространственно-армированных КМ.

Основным методом измерения локальных свойств материалов является метод инструментального индентирования (ИИ), методика которого пред-

ставлена в [1, 2]. Но на сегодняшний день нет разработанной методики применения этого метода к композиционным материалам. Помимо стандартной методики исследования существует множество других: использование инденторов разных форм и размеров [3–5], индентирование при высокой температуре [6] и др. Однако в приведенных источниках отсутствуют комплексные исследования применимости методов индентирования и форм инденторов для определения локальных свойств пространственно-армированных КМ, включая упругие.

Известно [7], что внедрение в поверхность клина вызывает бесконечные напряжения на границе участка контакта, поэтому использование остроконечных инденторов для исследуемого нами материала нецелесообразно. Поэтому в последние годы возрос интерес к применению сферических инденторов, которые подходят для проведения измерений в мягких материалах и в случаях, когда повреждения измеряемого объекта нежелательны.

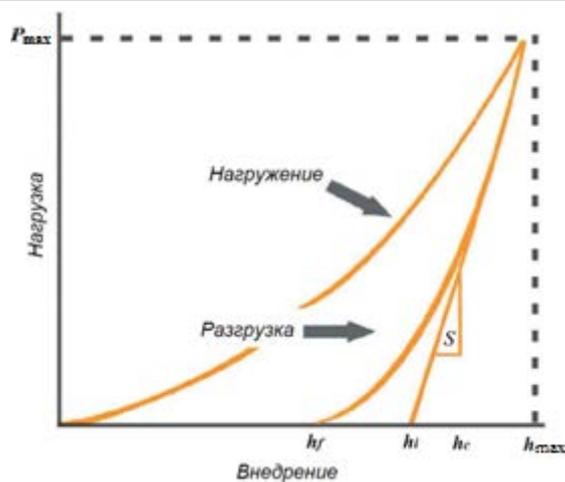
В работе [8] представлена методика измерения локального модуля упругости углерод-углеродного КМ (УУКМ) с использованием сферического индентора, однако точных экспериментальных данных не получено и нет достоверности в проведении эксперимента по этой методике. Поэтому следует обратить внимание на это исследование и внести все необходимые коррективы при использовании данной методики. Таким образом, задача исследования заключается в разработке методики определения локальных свойств пространственно-армированных композиционных материалов.

Метод инструментального индентирования. Физическая сущность метода инструментального индентирования заключается в следующем: индентор известной формы под действием нагрузки P вдавливаются в поверхность образца с постоянной скоростью. По достижении заданной нагрузки P_{\max} или глубины вдавливания h_{\max} движение индентора останавливается на определенное время для выдержки материала под нагрузкой. После этого индентор отводится в обратном направлении. В процессе вдавливания (нагружения) и отвода индентора (разгрузки) осуществляется непрерывная запись значений нагрузки и соответствующих перемещений индентора. Результирующая зависимость представляет собой кривую «нагрузка — внедрение» (рис. 1).

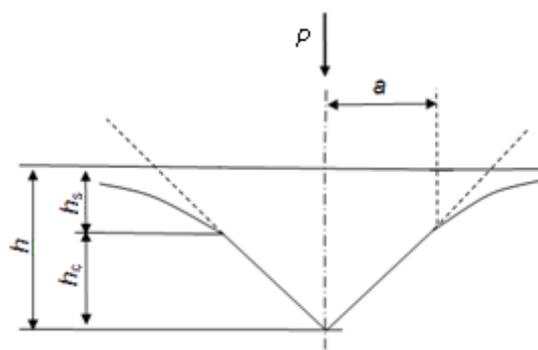
Для анализа кривых нагружения-разгрузки используют метод, предложенный Оливером и Фарром [9]. Помимо твердости описываемым методом можно определить эффективный модуль упругости, который по физическому смыслу наиболее соответствует модулю Юнга. Значение эффективного модуля упругости вычисляют по формуле

$$E_r = \frac{1}{\beta} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A_c}},$$

где β — константа, которая зависит от формы индентора; S — жесткость контакта; A_c — площадь проекции.



а



б

Рис. 1. Алгоритм измерения твердости методом наноиндентирования:

А — кривая $P(h)$ зависимости «нагрузка — внедрение»; б — схематическая иллюстрация измерения параметров кривой $P(h)$; h_{max} — максимальная глубина внедрения индентора; h_c — глубина внедрения с учетом прогиба поверхности; h_f — глубина восстановленного отпечатка; h_i — расстояние, соответствующее пересечению касательной к кривой разгрузки в начальной части с осью смещения; h_s — глубина упругого прогиба поверхности материала в зоне контакта с индентором; S — жесткость контакта

Достоинствами данного метода являются:

- теоретическое обоснование и корректные формулы для определения твердости и модуля упругости материала;
- нормативная база [1,2], которая частично обеспечивает применение метода инструментального вдавливания;
- наличие средств микро/нанотвердометрии и их метрологического обеспечения.

Модель взаимодействия двух сфер. В основе метода ИИ лежит аналитическое решение так называемой задачи Герца о взаимной деформации двух твердых шаров при их сжатии, которая подробно рассмотрена в [10].

Для моделирования процесса внедрения индентора в испытуемый образец под действием нагрузки с последующим ее снятием и регистрацией зависимости перемещения наконечника от нагрузки была построена плоская модель в конечно-элементном комплексе Ansys (рис. 2). Поскольку задача симметричная, в качестве модели было решено использовать четверть окружности радиусом 0,15 мм и прямоугольник с размерами 0,15×3×1 мм. Для разбиения использовались элементы PLANE183, размер которых был задан равным $9 \cdot 10^{-3}$ мм, а в области контакта – $2,5 \cdot 10^{-4}$ мм. Также было задано закрепление для нижней стороны прямоугольника с ограничением всех степеней свободы, и еще была задана нагрузка $9,81 \cdot 10^{-3}$ Н, приложенная к верхней стороне части окружности. В роли материала индентора выступает карбид вольфрама (WC), а для образца были заданы свойства матрицы УУКМ. Было принято считать, что оба материала обладают изотропными свойствами (табл. 1).

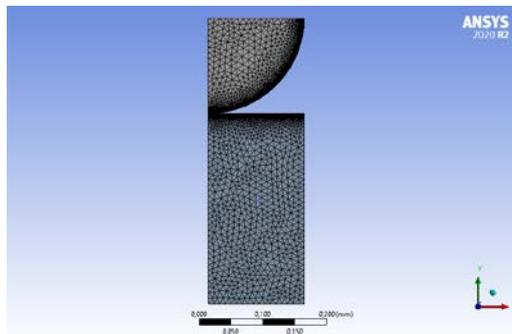


Рис. 2. Модель индентора и испытуемого образца в Ansys

Таблица 1

Свойства материалов модели

Характеристика	Карбид вольфрама	Матрица УУКМ
Модуль Юнга, МПа	$6,56 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^3$
Коэффициент Пуассона	0,313	0,25

Критерии прочности. Поскольку индентирование относится к методам неразрушающего контроля, очень важно не допустить разрушения материала под действием нагрузки. Ввиду того, что модель упругого контактного взаимодействия индентора и матрицы относится к сложному напряженному состоянию, целесообразно рассмотреть несколько критериев прочности, которые могут быть использованы для задачи определения эквивалентных напряжений, возникающих в образце материала при проведении испытаний.

В настоящее время нет критерия, который однозначно подходил бы для определения предельных напряжений [11], существует множество критериев, которые стали классическими и применяются в задачах хрупкого разрушения

и пластичности, а также более сложных критериев, составляющих комбинации из классических.

Существует пять классических теорий прочности [12]:

1) гипотеза Галилея (1638), которая связывает разрушение материала с наибольшим растягивающим главным напряжением;

2) теория максимальных относительных линейных деформаций (1684), согласно которой предельное состояние материала, независимо от того, находится ли он в линейном или сложном (плоском или пространственном) напряженном состоянии, наступает при достижении максимальной линейной относительной деформации в окрестности рассматриваемой точки тела предельного (опасного) значения;

3) теория максимальных касательных напряжений (1773), где за критерий прочности принимается наибольшее касательное напряжение;

4) гипотеза Кулона — Мора (1900), основанная на гипотезе о зависимости предельных касательных напряжений от среднего нормального напряжения и гипотезе о том, что названная зависимость обусловлена внутренним трением в твердом теле;

5) энергетическая теория (1904), которая формулируется следующим образом: предельное состояние материала, независимо от того, находится ли он в линейном или сложном (плоском или пространственном) напряженном состоянии, наступает при достижении удельной потенциальной энергии формоизменения в окрестности рассматриваемой точки тела предельного (опасного) значения.

Все описанные выше критерии имеют те или иные недостатки, поскольку не учитывают каких-либо свойств материала, применяются не для всех типов материалов или неточно описывают напряженное состояние исследуемого объекта. Как и теория Кулона — Мора, далее все последующие критерии будут иметь в выражении одну константу, ее применение обусловлено более высокой сходимостью между теорией и экспериментальными данными, так как константу выбирают в зависимости от материала, тем самым, теоретическая модель становится более точной.

Первым из таких критериев является соотношение Г.С. Писаренко и А.А. Лебедева [13] в виде следующего выражения:

$$\sigma_{\text{экв}} = \alpha \sigma_i + (1 - \alpha) \sigma_3,$$

где $\alpha = \sigma_p^{\text{оп}} / \sigma_c^{\text{оп}}$ — отношение предельных напряжений одноосных растяжения и сжатия; σ_i — интенсивность напряжений.

В работе [14] использовалось условие прочности предельного напряженного состояния Боткина—Миролюбова в виде

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1 + \alpha}{2} \sigma_i + \frac{1 - \alpha}{2} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3),$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные нормальные напряжения.

Рассмотренные критерии прочности не являются единственными критериями, по которым можно устанавливать предельное состояние. В рамках данной работы достаточно было выбрать ряд критериев для качественной оценки поведения материала при индентировании.

Результаты. В результате численного расчета с использованием Ansys были получены значения эквивалентного напряжения для различных теорий прочности. Чтобы различить поведение материала при индентировании, был введен безразмерный коэффициент, который рассчитывается по следующей формуле:

$$A_{кр} = \frac{\sigma_{экр}}{P} r_{конт}^2,$$

где P — нагрузка; $r_{конт}$ — радиус пятна контакта.

Данный коэффициент не зависит от нагрузки, прикладываемой индентором к материалу, и для каждой теории прочности имеет свое значение (табл. 2). Чем больше значение критерия, тем больше эквивалентные напряжения.

Таблица 2

Значения коэффициента $A_{кр}$ для различных теорий прочности

Теории прочности	Значение $A_{кр}$
Кулона — Мора, Писаренко — Лебедева	0,23
Энергетическая	0,31
Боткина — Миролюбова	0,36
Наибольших нормальных напряжений	0,48

Если рассмотреть распределение напряжений в зоне контакта, то все критерии можно разделить на две группы:

- 1) максимальные растягивающие напряжения расположены в области под точкой контакта (рис. 3, а);
- 2) имеется два ярко выраженных максимума: на границе радиуса контакта и под точкой контакта (рис. 3, б).

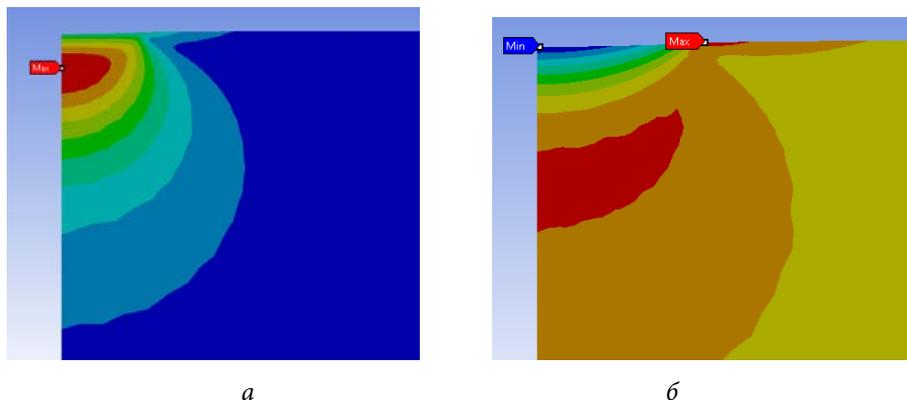


Рис. 3. Модели разрушения материала при индентировании

К первой группе относятся критерии наибольших касательных напряжений и энергетическая, а ко второй — Кулона — Мора, Боткина — Миролубова и Писаренко — Лебедева.

Выводы. В результате проведенных исследований были получены сведения о возможном характере разрушения композиционного материала при индентировании. Проведено численное моделирование методом конечных элементов процесса внедрения индентора в испытуемый образец под действием нагрузки. Полученные сведения о возможном характере разрушения композиционного материала при индентировании могут служить критерием для идентификации критического состояния материала. Показано, что, с точки зрения наиболее вероятного места разрушения, критерии делятся на две группы: к первой группе относятся критерии с максимальными растягивающими напряжениями в области точки контакта, а ко второй — на границе контактного радиуса. Предложен безразмерный коэффициент $A_{кр}$, позволяющий идентифицировать наиболее применимый для материала критерий разрушения, исходя из разрушающей нагрузки при индентировании. Результаты могут быть полезны при разработке методик исследования свойств материалов методом инструментального индентирования. В дальнейшем необходимо провести эксперимент, чтобы сопоставить его с полученными численными результатами для подтверждения разработанной методики.

Литература

- [1] ГОСТ Р 8.748-2011. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний. М., Стандартинформ, 2013.
- [2] ГОСТ Р 8.904-2015. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 2. Поверка и калибровка твердомеров. М., Стандартинформ, 2016.
- [3] Медведский А.Л., Корнев Ю.В., Курбатов А.С. Исследование физико-механических свойств 4D углерод-углеродного композиционного материала на макро и микроуровнях при действии высоких температур. *Труды МАИ*, 2010, № 41. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=23804>
- [4] Огар П.М., Тарасов В.А., Дайнеко А.А. К вопросу упругопластического внедрения сферического индентора. *Системы. Методы. Технологии*, 2011, т. 10, № 2, с. 14–16.
- [5] Тарасов В.А., Федоров И.Б. Анализ теорий твердости при индентировании сферой. *Механики XXI века*, 2015, № 14, с. 81–88.
- [6] Chikova O.A., Shishkina E.V., Konstantinov A.N. Measurement of Young's modulus and hardness of Al-50 Wt % Sn alloy phases using nanoindentation. *Phys. Metals Metallogr.*, 2013, vol. 114, no. 7, pp. 616–622. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0031918X1307003X>
- [7] Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М., Мир, 1989.
- [8] Андреева Ю.Д. Методика контактного неразрушающего контроля качества углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ). Выпуск. квалификац. работа. Королев, Технологический университет, 2019.

-
- [9] Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *J. Mater. Res.*, 1992, vol. 7, no. 6, pp. 1564–1583. DOI: <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
- [10] Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М., Наука, 1979.
- [11] Потапова Л.Б. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. М., Машиностроение-1, 2005.
- [12] Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т. 1. М., Наука, 1975.
- [13] Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев, Наукова думка, 1976.
- [14] Батанова О.А., Матвиенко Ю.Г. Закономерности образования трещин при скалывании кромки образца и индентировании хрупких материалов. *Физическая мезомеханика*, 2015, № 18, с. 22–36.

Шкаранова Светлана Владимировна — студентка кафедры «Основы конструирования машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Магнитский Илья Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Шкаранова С.В. Методика определения локальных свойств деталей из пространственно-армированных композиционных материалов. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 06(59). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-06-705>

METHOD FOR DETERMINING LOCAL PROPERTIES OF PARTS FROM SPATIALLY-REINFORCED COMPOSITE MATERIALS

S.V. Shkaranova

shkaranovasv@student.bmstu.ru

SPIN-code: 5527-2824

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Currently, the creation and updating of non-destructive testing methods for composite materials are becoming more and more popular. In this paper, the method of instrumental indentation and the features of its application to composites are considered. A numerical calculation of the indentation process was carried out according to various strength criteria using the Ansys software package. Based on the data obtained, two groups of criteria were identified for the area of material destruction. In the future, this division will help to select the criteria for calculating the contact strength correctly and analyze the fracture of composite materials when using the method of instrumental indentation.

Keywords

Composite materials, finite element method, strength theory, instrumental indentation method, Hertz problem, contact strength, effective elastic modulus, material fracture models, carbon-carbon composite material

Received 14.05.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] GOST R 8.748-2011. Metally i splavy. Izmerenie tverdosti i drugikh kharakteristik materialov pri instrumental'nom indentirovanii. Chast' 1. Metod ispytaniy [State standard GOST R 8.748-2011. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1. Test method]. Moscow, Standartinform Publ., 2013 (in Russ.).
- [2] GOST R 8.904-2015. Izmerenie tverdosti i drugikh kharakteristik materialov pri instrumental'nom indentirovanii. Chast' 2. Poverka i kalibrovka tverdomerov [State standard GOST R 8.904-2015. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 2. Verification and calibration of testing machines]. Moscow, Standartinform Publ., 2016 (in Russ.).
- [3] Medvedskiy A.L., Kornev Yu.V., Kurbatov A.S. Research of physicomechanical properties 4D carbon-carbon of the composite material on macro and micro levels at action of heats. *Trudy MAI*, 2010, no. 41. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=23804> (in Russ.).
- [4] Ogar P.M., Tarasov V.A., Dayneko A.A. On the issue of the elastic-plastic introduction of a spherical indenter. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2011, vol. 10, no. 2, pp. 14–16 (in Russ.).
- [5] Tarasov V.A., Fedorov I.B. Analysis of solid-state theory at indentation by a sphere. *Mekhaniki XXI veku* [Mechanical Engineers to XXI Century], 2015, no. 14, pp. 81–88 (in Russ.).
- [6] Chikova O.A., Shishkina E.V., Konstantinov A.N. Measurement of Young's modulus and hardness of Al–50 Wt % Sn alloy phases using nanoindentation. *Phys. Metals Metallogr.*, 2013, vol. 114, no. 7, pp. 616–622. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0031918X1307003X>

-
- [7] Johnson K.L. Contact mechanics. Cambridge University Press, 1987. (Russ. ed.: Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya. Moscow, Mir Publ., 1989.)
- [8] Andreeva Yu.D. Metodika kontaktnogo nerazrushayushchego kontrolya kachestva uglerod-uglerodnogo kompozitsionnogo materiala (UUKM). Vypusk. kvalifikats. Rabota [Method of contact non-destructive quality control of carbon-carbon composite (UUKM). Graduation thesis]. Korolev, Tekhnologicheskii universitet Publ., 2019 (in Russ.).
- [9] Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *J. Mater. Res.*, 1992, vol. 7, no. 6, pr. 1564–1583. DOI: <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
- [10] Goodier J.N., Timoshenko S.P. Theory of elasticity. McGraw-Hill, 1970. (Russ. ed.: Teoriya uprugosti. Moscow, Nauka Publ., 1979.)
- [11] Potapova L.B. Mekhanika materialov pri sloznom napryazhenom sostoyanii [Material mechanics at combined stress]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2005 (in Russ.).
- [12] Filin A.P. Prikladnaya mekhanika tverdogo deformiruemogo tela. T. 1 [Applied mechanics of deformable body. Vol. 1]. Moscow, Nauka Publ., 1975 (in Russ.).
- [13] Pisarenko G.S., Lebedev A.A. Deformirovanie i prochnost' materialov pri sloznom napryazhenom sostoyanii [Deformation and strength of materials at combined stress]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1976 (in Russ.).
- [14] Batanova O.A., Matvienko Yu.G. Crack initiation in edge chipping and indentation of brittle materials. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2015, no. 18, pp. 22–36 (in Russ.).

Shkaranova S.V. — Student, Department of Machine Design Principles, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Magnitskiy I.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Machine Design Principles, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Shkaranova S.V. Method for determining local properties of parts from spatially-reinforced composite materials. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 06(59). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-06-705.html> (in Russ.).