

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.П. Федоткин, Е.В. Гладких, А.А. Русаков, А.С. Усеинов

Александр Павлович Федоткин (ORCID 0000-0003-3822-4811)*

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

Московский физико-технический институт, Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация, 141701

E-mail: aleksandr.fedotkin@phystech.edu*

Екатерина Владимировна Гладких (ORCID 0000-0001-8273-3934), Алексей Андреевич Русаков (ORCID 0000-0001-5702-1353), Алексей Серверович Усеинов (ORCID 0000-0002-9937-0954)

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

E-mail: ekat.gladkih@yandex.ru, alexey.a.rusakov@yandex.ru, useinov@mail.ru

Сочетание индентирования с получением высококачественных изображений тестируемого образца было применено для получения новых данных о деформационных процессах в материале за счет внедрения метода цифровой обработки серии последовательных изображений. В данной работе проводился анализ остаточных отпечатков, возникающих в материале после вдавливания алмазной пирамиды типа Виккерса. Было проведено исследование деформационного поведения образца стали марки 40X2H2MA с графитовыми включениями и сплава алюминия, модифицированного фуллереном. Испытания проводились на приборе НаноСкан-NV, наблюдение велось в режиме темного поля, выбранном для повышения контрастности изображения. Схема испытаний соответствовала ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007, полученные изображения отпечатков анализировались в программе, реализованной на языке Python. Были построены карты поля смещений, также рассчитаны зависимости остаточного перемещения точек индентированной поверхности относительно исходного изображения. Благодаря рекомендациям по обработке изображений, реализованный алгоритм позволяет проводить исследования материалов, гетерогенных по структуре и внешнему виду. На первом шаге алгоритма применяется окно Ханнинга для устранения последствий краевых эффектов при последующем двумерном преобразовании Фурье. Затем вычисляется прямое преобразование Фурье для изображения до и после индентирования. После этого методом взаимного спектрального анализа осуществляется определение пространственного сдвига в микрообласти изображения. Алгоритм использует быстрое преобразование Фурье для ускорения расчетов. После определения значения сдвига с максимальной корреляцией в его окрестности рассчитывается координата взвешенного центроида, на основании значений корреляции для близких смещений. Это позволяет добиться субпиксельной точности. Получаемые карты и зависимости остаточных деформаций от расстояния информативны в плане анализа доминирующих механизмов влияния локального механического давления на пластическую деформацию тестируемого материала.

Ключевые слова: инструментальное индентирование, распределение деформаций, методы обработки изображений, быстрое преобразование Фурье, поля смещений

Для цитирования:

Федоткин А.П., Гладких Е.В., Русаков А.А., Усеинов А.С. Анализ деформационного поведения материалов при индентировании с использованием методов цифровой обработки изображений. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 10. С. 102–108. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.11y.

For citation:

Fedotkin A.P., Gladkikh E.V., Rusakov A.A., Useinov A.S. Digital processing of surface images after indentation to analyze the deformation behavior of the material. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 10. P. 102–108. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.11y.

DIGITAL PROCESSING OF SURFACE IMAGES AFTER INDENTATION TO ANALYZE THE DEFORMATION BEHAVIOR OF THE MATERIAL

A.P. Fedotkin, E.V. Gladkikh, A.A. Rusakov, A.S. Useinov

Alexander P. Fedotkin (ORCID 0000-0003-3822-4811)*

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Institutskiy Per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

E-mail: aleksandr.fedotkin@phystech.edu*

Ekaterina V. Gladkikh (ORCID 0000-0001-8273-3934), Alexey A. Rusakov (ORCID 0000-0001-5702-1353), Alexey S. Useinov (ORCID 0000-0002-9937-0954)

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

E-mail: ekat.gladkih@yandex.ru, alexey.a.rusakov@yandex.ru, useinov@mail.ru

The combination of indentation with the acquisition of high-quality images of the test specimen was applied to obtain new data on the deformation processes in the material by introducing the method of digital processing of a series of sequential images. In this work, we analyzed the residual imprints occurring in the material after an indentation of a Vickers-type diamond pyramid. The deformation behavior of a 40X2H2MA steel sample with graphite inclusions and an aluminum alloy modified with fullerene was investigated. The tests were carried out on the NanoScan-HV device, the observation was carried out in the dark field mode chosen to increase the image contrast. The test scheme corresponded to GOST R ISO 6507-1-2007. The obtained images of the prints were analyzed in a program implemented in the Python language. The displacement field maps were constructed, and the dependencies of residual displacement of indented surface points with respect to the initial image were also calculated. Thanks to the recommendations for image processing, the implemented algorithm makes it possible to investigate materials that are heterogeneous in structure and appearance. In the first step of the algorithm, a Haning window is applied to eliminate the effects of edge effects in the subsequent two-dimensional Fourier transform. Then the forward Fourier transform is computed for the image before and after indentation. This is followed by mutual spectral analysis to determine the spatial shift in the microregion of the image. The algorithm uses the fast Fourier transform to speed up the calculations. After determining the value of the shift with maximum correlation in its vicinity, the coordinate of the weighted centroid is calculated, based on the correlation values for close offsets. This makes it possible to achieve subpixel accuracy. The obtained maps and distance dependences of residual deformations are informative in terms of analysis of the dominant mechanisms of local mechanical pressure influence on plastic deformation of the material under test.

Key words: instrumental indentation, strain distribution, image processing methods, fast Fourier transform, displacement fields

ВВЕДЕНИЕ

Созданию новых конструкционных материалов с заданными свойствами предшествует целый ряд испытаний, включающих изучение в том

числе их механических характеристик [1, 2]. Усовершенствование методов анализа деформированного состояния, помимо получения количественных характеристик твердости [3], может сузить спектр поисковых исследований по разработке но-

вых материалов и ускорить подбор новых материалов под решаемые задачи [4]. По сравнению с испытанием на растяжение индентирование позволяет исследовать гораздо меньшие объемы образца, а также не требует изготовления деталей сложной формы из тестируемого материала [5]. Кроме того, техника прецизионного силового нанотестинга является способом получения и других интересных свойств [6]. Целый ряд работ направлен на установление взаимосвязи значений прочности, полученных в испытаниях на растяжение и чисел твердости [7, 8].

Цифровая корреляция изображений (называемая в иностранной литературе Digital Image Correlation, DIC) – это аналитический метод, который сравнивает изображения поверхности образца во время испытаний для создания карт деформаций в полном поле наблюдения [9-11]. Эта технология дает больше информации, чем традиционный двухточечный экстензометр или тензометрический датчик, и позволяет увидеть полную картину поведения материала как в рамках непрерывной кривой напряжение-деформация, так и за ее пределами [12-14].

Ученые и инженеры нашли десятки полезных применений DIC, включая обнаружение трещин, невидимых невооруженным глазом, визуализацию локализованного сужения и прерывистой текучести, сравнение различий в поведении материала между двумя отдельными составами [15, 16]. Такие возможности делают метод DIC привлекательным для анализа изображений остаточных отпечатков, полученных в методе инструментального индентирования. В данной работе нагрузка была подобрана таким образом, чтобы в поле зрения наблюдался не только отпечаток, но и окружающие его области размером не менее нескольких радиусов окружности, описанной около отпечатка. Это дает возможность проследить за деформациями, удаленными от границ отпечатка на значительное расстояние.

Поведение многих твердых углеродных материалов (например, сверхупругих керамик) при вдавливании наконечников в процессе измерения твердости таково, что после снятия нагрузки контуры отпечатка восстанавливаются практически до исходного состояния. Тем не менее, участки поверхности, лежащие внутри области реального контакта индентора с поверхностью материала, чаще всего имеют едва различимые следы остаточной деформации. Например, в ряде случаев такие образцы содержат включения, деформация которых преимущественно пластическая. Метод цифровой корреляции изображений в таком случае

оказывается мощной методикой, позволяющей отличить область, взаимодействовавшую с индентором при определенной нагрузке, а значит, и рассчитать твердость под нагрузкой для данного материала с высоким уровнем упругого восстановления отпечатка.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Входными данными для работы алгоритма являются фотографии образца до и после индентирования. При фотографировании необходимо получить изображения в высоком разрешении. Важными факторами, влияющими на эффективность работы алгоритма, являются точность позиционирования камеры, а также качественная фокусировка. Предпочтительным является расположение отпечатка в центре изображения.

Частью подготовительной работы также является разметка вершин полученного отпечатка и определение координаты центра. На однородных образцах с резко-контрастными областями вне и внутри отпечатка есть возможность применения алгоритмов автоматического нахождения границ отпечатков [17, 18]. Для получения координат вершин и центра с высокой точностью для образцов стали с графитовыми включениями и алюминия, модифицированного фуллереном, исследованных в данной работе, данная процедура проводилась вручную, поскольку данные образцы имеют высокую неоднородность.

Работа алгоритма начинается с сопоставления изображений поверхности образца до и после проведения индентирования по наименее деформированным прямоугольным областям в углах изображений. Ниже описан алгоритм сопоставления.

Функция расчета взаимного спектра используется для обнаружения линейных сдвигов, которые присутствуют между двумя изображениями. Для применения этой операции была использована теорема о сдвиге пространственного спектра Фурье с линейным сдвигом в области пространственных частот. Такой метод можно использовать как для быстрой регистрации изображений, так и для оценки величины смещения картин [19].

Работа функции основана на выполнении следующих действий:

Сначала к каждому изображению применяется окно Ханнинга [20], чтобы удалить возможные краевые эффекты.

Затем вычисляются прямые двумерные дискретные преобразования Фурье DFT для каждого исходного массива:

$$\mathbf{Ga} = F\{src^1\}, \mathbf{Gb} = F\{src^2\}, \quad (1)$$

где F – прямое преобразование Фурье.

На следующем этапе вычисляется спектр перекрестной мощности каждой матрицы в частотной области:

$$R = \frac{G_a G_b^*}{|G_a G_b^*|} \quad (2)$$

Затем взаимная корреляция преобразуется обратно во временную область с помощью обратного преобразования Фурье:

$$r = F^{-1}\{R\} \quad (3)$$

Наконец, вычисляется местоположение пика. В его окрестности, размером 5×5 пикселей, рассчитываются координаты "центра масс". Эти координаты используются в качестве искомого смещения. $(\Delta x, \Delta y) = \text{weightedCentroid}\{\text{argmax}(x, y)\{r\}\}$ (4)

Если значение не равно нулю, параметр отклика вычисляется как сумма элементов r в пределах центроида 5×5 вокруг местоположения пика. Оно нормализуется максимум до 1 (что означает наличие одного пика) и будет меньше при наличии нескольких пиков.

Для каждой такой области вычисляется смещение; за общее смещение изображений принимается медианное по каждой оси. Неточность определения взаимного расположения изображений вносит систематическую ошибку в значение каждого вектора поля смещений.

Затем выбирается шаг сетки и размер ячейки для сопоставления фрагментов. Шаг сетки определяет количество фрагментов, подлежащих сопоставлению. Следует выбирать шаг сетки достаточно малым, для получения достаточной плотности точек смещения. Размер ячейки значительно влияет на качество совмещения фрагментов.

Вычисляется смещение соответствующих фрагментов с использованием алгоритма обнаружения поступательных сдвигов из библиотеки `opencv`. Данный алгоритм основан на использовании свойств преобразования Фурье, применяемого для определения значений корреляций изображений со сдвигом [21].

Используя информацию о размере кадра и линейном размере пикселя, вычисляется набор смещений для точек расчетной сетки.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент был проведен с использованием твердомера Виккерса НаноСкан-NV. В работе исследовались образцы: сталь марки 40X2H2MA с графитовыми включениями, подвергнутая травлению в течении 10 с в 4% HNO_3 , а также образец алюминиевого сплава Д16, модифицированного фуллереном С60. Для повышения контраста поверхность образца стали наблюдалась в режиме темного поля видеомикроскопа.

Ручная разметка отпечатков позволила с высокой точностью определить координату центра отпечатка, разделить изображение на области в соответствии с их расположением относительно отпечатка и построить зависимости для отдельных областей.

Обработка изображений проводилась с помощью программы на языке Python, реализующей описанный выше алгоритм.

Для изображений, использованных в данной работе, применялись следующие параметры:

- 0,05 мкм – экстраполированный линейный размер пикселя,
- 300×300 пикселей (16×16 мкм) – размер сопоставляемых фрагментов,
- 20 пикселей – шаг сетки,
- 150×200 – размер сетки,
- 30 400 – количество точек,
- $187 \text{ мкм} \times 247 \text{ мкм}$ – размер области на изображении,
- 4632×3488 – разрешение исходных изображений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рис. 1 демонстрирует данные, полученные на образце стали 40X2H2MA с графитовыми включениями. Изображение поверхности образца после индентирования, а также «тепловая карта» поля смещений с применением пороговой фильтрации показаны на рис. 1а. Рис. 1б демонстрирует профиль сечения тепловой карты, проведенный вдоль линии, показанной белым цветом на рис. 1а внизу. Профиль проводился как срединный перпендикуляр к одной из сторон отпечатка наружу от отпечатка.

Зависимости величины смещения d относительно координаты от границы отпечатка x вдоль проведенного профиля, полученные по разным сторонам отпечатка, оказались близки между собой, что свидетельствует в пользу однородности деформации. Вид графика смещения говорит о наличии максимальной деформации вблизи отпечатка и гиперболическому закону ее уменьшения при удалении от границы отпечатка.

На рис. 2 показаны схожие с рис. 1 изображения для образца алюминиевого сплава, модифицированного фуллереном. Данный сплав продемонстрировал высокую неоднородность областей, что отразилось на «тепловой карте»: внизу справа имеет место наличие резкого перепада значений смещений, что свидетельствует о торможении деформаций существовавшей до индентирования трещиной на поверхности образца. Для лучшего отображения деформационной картины были проведены два профиля на «тепловой карте», соответствовавшие разным областям.

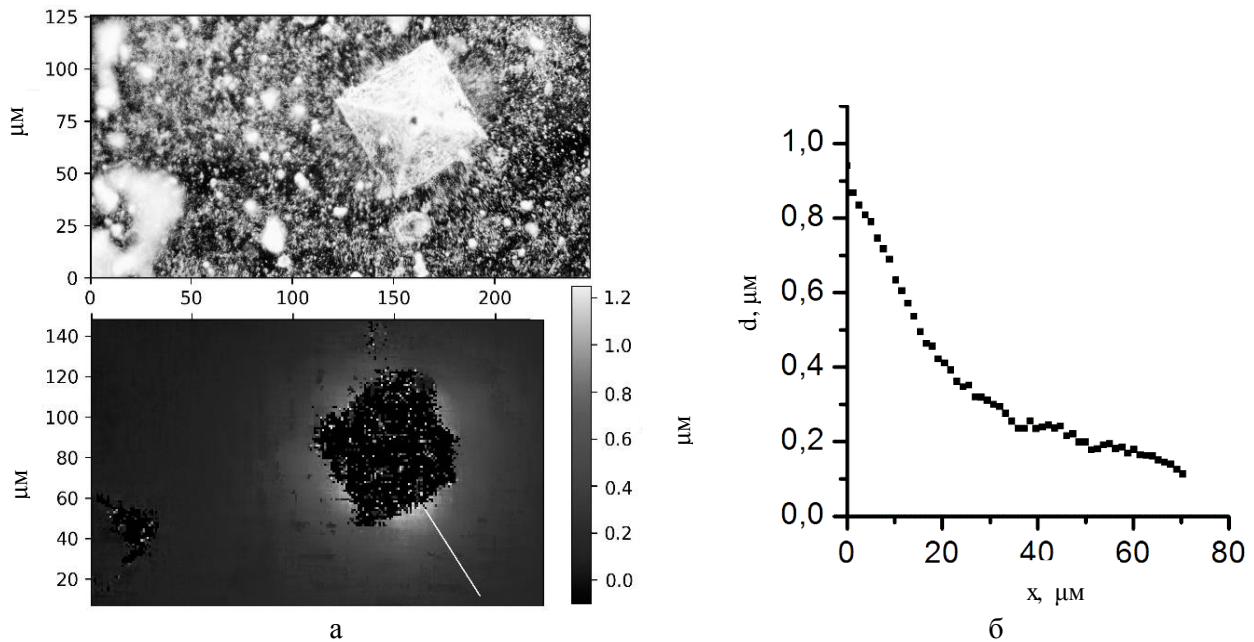


Рис. 1. а) Изображение отпечатка, полученного на образце стали 40X2H2MA с графитовыми включениями (вверху) и «тепловая карта» поля смещений с применением пороговой фильтрации (внизу), б) Профиль, построенный по «тепловой карте»
 Fig. 1. a) Image of the print obtained on a sample of 40X2H2MA steel with graphite inclusions (top) and a "heat map" of the displacement field using threshold filtration (bottom), б) Profile built on the "heat map"

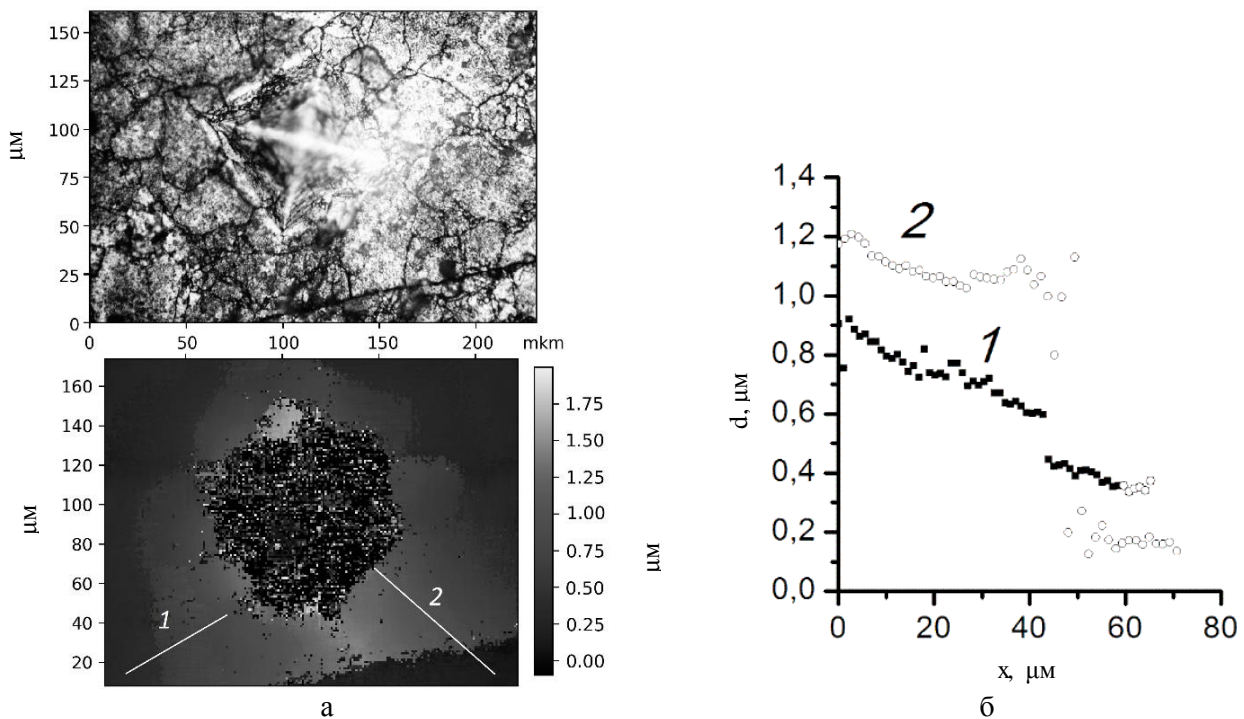


Рис. 2. а) Изображение отпечатка, полученного на образце алюминиевого сплава Д16, модифицированного С60 (вверху) и «тепловая карта» поля смещений с применением пороговой фильтрации (внизу), б) Профили, построенные по «тепловой карте»
 Fig. 2. a) Image of the print obtained on a sample of aluminum alloy D16 modified with C60 (top) and a "heat map" of the displacement field using threshold filtration (bottom), б) Profiles constructed using the "heat map"

Профиль, проведенный через область внизу слева, выявил снижение величины смещения, сопровождавшееся скачком порядка 100 нм, что может быть связано с торможением деформации о

границу зерна. Тем не менее, после скачка деформация остается ненулевой, что говорит о наличии смещения зерна в целом. Профиль №2, проведенный через трещину, подтвердил предположение,

сделанное по «тепловой карте»: за трещину деформация не распространилась – смещения практически равняются нулю. При этом скачок деформаций существенно превышает изменение в случае области с границами зерен (профиль №1).

ВЫВОДЫ

Предложенная методика позволяет определять поля смещений в областях, прилегающих к остаточным отпечаткам, образующимся при проведении индентирования. Метод не требует использования дополнительного оборудования. Методика может быть использована при проведении индентирования наконечниками различных типов.

Использование микрофотографий налагает ограничения на использования данной методики такие как:

- Необходимо достаточно точное позиционирование камеры;
- Для определения смещений по максимуму корреляций изображения поверхность материала должна обладать текстурой;
- Сопоставление фрагментов оказывается затруднительным при наличии значительного

изменения смещений частей внутри одного фрагмента.

Для реализации метода необходимо получать качественные изображения в высоком разрешении, не менее 10 мега пикселей.

В ходе дальнейших работ планируется проверка возможности использования данного метода при определении полей деформаций во время проведении индентирования с помощью прозрачного индентора, как на этапе нагружения, так при разгрузке индентора [22].

Исследование выполнено с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФГБНУТИСНУМ наноструктурных, углеродных и сверхтвердых материалов».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The study was carried out using the equipment of the Center for Collective Use of the Federal State Budgetary Scientific Institution TISNUM “Research of nanostructured, carbon and superhard materials”.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nurmurodov S., Rasulov A., Turakhodjaev N., Bakhadirov K., Yakubov L., Abdurakhmanov K., Tursunov T. // *J. Mater. Sci. Res.* 2016. V. 5. N 3. P. 52. DOI: 10.5539/jmsr.v5n3p52.
2. Jayakumar A., Radoor S., Siengchin S., Shin G.H., Kim J.T. // *Sci. Total Environ.* 2023. V. 878. P. 163156. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163156.
3. Усеинов А., Решетов В., Маслеников И., Кравчук К. // *Наноиндустрия.* 2015. Т. 7. С. 52–61. DOI: 10.22184/1993-8578.2015.61.7.52.60.
4. Zinkle S.J.J., Was G.S.S. // *ACTA Mater.* 2013. V. 61. N 3. P. 735–758. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.11.004.
5. Milman Y.V., Chugunova S.I., Goncharova I.V., Golubenko A.A. // *Usp. Fiz. Met. Phys. Met.* 2018. V. 19. N 3. P. 271–308. DOI: 10.15407/ufm.19.03.271.
6. Головин Ю.И. // *Физика Твердого Тела.* 2021. Т. 63. № 1. С. 3. DOI: 10.21883/ftt.2021.01.50395.171.
7. Гладких Е.В., Гусев А.А., Маслеников И.И., Решетов В.Н., Усеинов А.С. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 12. С. 28–33. DOI: 10.6060/ivkkt.20216412.1y.
8. Андриашин А.А., Демичев Д.В., Соловьев М.Е. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2010. Т. 53. Вып. 4. С. 103–104.
9. Allaoui S., Rekik A., Gasser A., Blond E., Andreev K. // *Constr. Build. Mater.* 2018. V. 162. P. 334–344. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.055.
10. Baqersad J., Poozesh P., Niezrecki C., Avitabile P. // *Mech. Syst. Signal Process.* 2017. Т. 86. С. 17–34. DOI: 10.1016/j.ymsp.2016.02.011.

REFERENCES

1. Nurmurodov S., Rasulov A., Turakhodjaev N., Bakhadirov K., Yakubov L., Abdurakhmanov K., Tursunov T. // *J. Mater. Sci. Res.* 2016. V. 5. N 3. P. 52. DOI: 10.5539/jmsr.v5n3p52.
2. Jayakumar A., Radoor S., Siengchin S., Shin G.H., Kim J.T. // *Sci. Total Environ.* 2023. V. 878. P. 163156. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163156.
3. Useinov A., Reshetov V., Maslеников I., Kravchuk K. // *Nanoindustry.* 2015. V. 7. P. 52–61. DOI: 10.22184/1993-8578.2015.61.7.52.60.
4. Zinkle S.J.J., Was G.S.S. // *ACTA Mater.* 2013. V. 61. N 3. P. 735–758. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.11.004.
5. Milman Y.V., Chugunova S.I., Goncharova I.V., Golubenko A.A. // *Usp. Fiz. Met. Phys. Met.* 2018. V. 19. N 3. P. 271–308. DOI: 10.15407/ufm.19.03.271.
6. Golovin Y.I. // *Fiz. Tverdogo Tela.* 2021. V. 63. N 1. P. 3. (in Russian). DOI: 10.1134/S1063783421010108.
7. Gladkikh E.V., Gusev A.A., Maslеников I.I., Reshetov V.N., Useinov A.S. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2021. V. 64. N 12. P. 28–33 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216412.1y.
8. Andriashin A.A., Demichev D.V., Solovyov M.E. // *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2010. V. 53. N 4. P. 103–104 (in Russian).
9. Allaoui S., Rekik A., Gasser A., Blond E., Andreev K. // *Constr. Build. Mater.* 2018. V. 162. P. 334–344. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.055.
10. Baqersad J., Poozesh P., Niezrecki C., Avitabile P. // *Mech. Syst. Signal Process.* 2017. Т. 86. С. 17–34. DOI: 10.1016/j.ymsp.2016.02.011.

11. **Klimaszewski J., Kondej M., Kawecki M., Putz B.** Registration of Infrared and Visible Images Based on Edge Extraction and Phase Correlation Approaches BT - Image Processing and Communications Challenges. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2013. P. 153–162. DOI: 10.1007/978-3-642-32384-3_19.
12. **Gamboa C.B., Martín-Béjar S., Vilches F., Castillo López G., Hurtado L.** // *Materials*. 2019. V. 12. N 24. DOI: 10.3390/ma12244156.
13. **Bai R., Jiang H., Li Z., Li W.** // *Opt. Lasers Eng.* 2017. V. 90. P. 48–58. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.09.010.
14. **Герасимова Т.Е.** // *Вестн. СамГУ. Механика*. 2015. Т. 3. № 125. С. 73–87.
15. **Falk A., Marsavina L., Pop O.** // *Proc. Struct. Integr.* 2019. V. 18. P. 214–222. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.156.
16. **Луценко А.Н., Одинцев И.Н., Гриневич А.В., Северов П.Б., Плугатарь Т.П.** // *Авиац. материалы и технологии*. 2014. Т. S4. С. 70–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-70-86.
17. **Федоткин А.П., Лактионов И.В., Кравчук К.С., Масленников И.И., Усеинов А.С.** // *Приборы и техника эксперим.* 2021. № 3. С. 20–26. DOI: 10.31857/s0032816221030198.
18. **Moreira F.D., Kleinberg M.N., Arruda H.F., Freitas F.N., Parente M.M, Costa de Albuquerque V.H., Filho P.P.** // *Expert Syst. Appl.* 2016. V. 45. P. 294–306. DOI: 10.1016/j.eswa.2015.09.025.
19. **Sarvaiya J.N., Patnaik S., Kothari K.** // *J. Pattern Recognit. Res.* 2012. V. 7. P. 90–105. DOI: 10.2312/3DOR/3DOR12/119-126.
20. **Smith J.O.** Spectral audio signal processing. Stanford: Stanford University. 2011. 654 p.
21. **Blaber J., Adair B., Antoniou A.** // *Exp. Mech.* 2015. V. 55. N 6. P. 1105–1122. DOI: 10.1007/s11340-015-0009-1.
22. **Maslenikov I.I., Reshetov V.N., Useinov A.S., Doronin M.A.** // *Instruments Exp. Tech.* 2018. V. 61. N 5. P. 719–724. DOI: 10.1134/S002044121804022X.
11. **Klimaszewski J., Kondej M., Kawecki M., Putz B.** Registration of Infrared and Visible Images Based on Edge Extraction and Phase Correlation Approaches BT - Image Processing and Communications Challenges. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2013. P. 153–162. DOI: 10.1007/978-3-642-32384-3_19.
12. **Gamboa C.B., Martín-Béjar S., Vilches F., Castillo López G., Hurtado L.** // *Materials*. 2019. V. 12. N 24. DOI: 10.3390/ma12244156.
13. **Bai R., Jiang H., Li Z., Li W.** // *Opt. Lasers Eng.* 2017. V. 90. P. 48–58. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.09.010.
14. **Gerasimova T.E.** // *Vestn. Samar. Gos. Univ. Mekhanika*. 2015. V. 3. N 125. P. 73–87 (in Russian).
15. **Falk A., Marsavina L., Pop O.** // *Proc. Struct. Integr.* 2019. V. 18. P. 214–222. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.156.
16. **Lutsenko A.N., Odintsev I.N., Grinevich A.V., Severov P.B., Plugatar T.P.** // *Aviats. Mater. Technol.* 2014. V. S4. P. 70–86 (in Russian). DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-70-86.
17. **Fedotkin A.P., Laktionov I.V., Kravchuk K.S., Maslennikov I.I., Useinov A.S.** // *Pribory Tekh. Experim.* 2021. N 3. P. 20–26 (in Russian). DOI: 10.31857/s0032816221030198.
18. **Moreira F.D., Kleinberg M.N., Arruda H.F., Freitas F.N., Parente M.M, Costa de Albuquerque V.H., Filho P.P.** // *Expert Syst. Appl.* 2016. V. 45. P. 294–306. DOI: 10.1016/j.eswa.2015.09.025.
19. **Sarvaiya J.N., Patnaik S., Kothari K.** // *J. Pattern Recognit. Res.* 2012. V. 7. P. 90–105. DOI: 10.2312/3DOR/3DOR12/119-126.
20. **Smith J.O.** Spectral audio signal processing. Stanford: Stanford University. 2011. 654 p.
21. **Blaber J., Adair B., Antoniou A.** // *Exp. Mech.* 2015. V. 55. N 6. P. 1105–1122. DOI: 10.1007/s11340-015-0009-1.
22. **Maslenikov I.I., Reshetov V.N., Useinov A.S., Doronin M.A.** // *Instruments Exp. Tech.* 2018. V. 61. N 5. P. 719–724. DOI: 10.1134/S002044121804022X.

Поступила в редакцию 12.05.2023

Принята к опубликованию 02.06.2023

Received 12.05.2023

Accepted 02.06.2023