

DREAM

<http://dream-journal.org>

ISSN 2410-9908

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.1

Diagnostics, Resource and Mechanics
of materials and structures

1, 2023
January-February

<http://dream-journal.org>

Editor-in-Chief: **Sergey V. Smirnov**
Deputy Editors-in-Chief: **Sergey V. Gladkovsky**
Deputy Editors-in-Chief: **Evgenii Yu. Prosviryakov**

Editorial Council

Anatoly A. Burenin (Russia)
Irina G. Goryacheva (Russia)
Janez Grum (Slovenia)
Mikhail P. Lebedev (Russia)
Leopold I. Leontiev (Russia)
Evgeny V. Lomakin (Russia)
Valery P. Matveenko (Russia)
Nikolay A. Makhutov (Russia)
Nikita F. Morozov (Russia)
Vladimir V. Moskvichev (Russia)
Sergey V. Panin (Russia)
Vasily M. Fomin (Russia)
Shao Wen-zhu (China)

Editorial Board

Boris V. Artemyev (Moscow)
Vladimir A. Bataev (Novosibirsk)
Ivan A. Bataev (Novosibirsk)
Aleksandr K. Belyaev (St.-Peterburg)
Sergey V. Burov (Ekaterinburg)
Vladimir O. Vaskovsky (Ekaterinburg)
Dmitry I. Vichuzhanin (Ekaterinburg)
Vladimir G. Degtyar (Miass)
Igor G. Emelyanov (Ekaterinburg)
Sergey M. Zadvorkin (Ekaterinburg)
Alexander G. Zalazinsky (Ekaterinburg)
Anatoly V. Konovalov (Ekaterinburg)
Vladimir N. Kostin (Ekaterinburg)
Tatyana P. Lyubimova (Perm)
Aleksey V. Makarov (Ekaterinburg)
Vladimir A. Mironov (Ekaterinburg)
Sergey A. Mikhaylov (Kazan)
Radik R. Mulyukov (Ufa)
Vitaly V. Muravyov (Izhevsk)
Aleksandr P. Nichipuruk (Ekaterinburg)
Oleg A. Plekhov (Perm)
Anna M. Povlotskaya (Ekaterinburg)
Nataliya B. Pugacheva (Ekaterinburg)
Igor Yu. Pyshmintsev (Chelyabinsk)
Anatoly B. Rinkevich (Ekaterinburg)
Roman A. Savray (Ekaterinburg)
Alexander S. Smirnov (Ekaterinburg)
Alexander I. Ulyanov (Izhevsk)
Yulia V. Khudorozhkova (Ekaterinburg)

Eelena E. Verstakova, editor of the English translation
Olga A. Verstakova, editor of Russian texts
Anna V. Garieva, maker-up
Galina V. Torlopova, associate editor
Raul N. Shakirov, site admin

Postal address: Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya st., 620049,
Ekaterinburg, Russian Federation
phone: +7 (343) 375-35-83,
fax: +7 (343) 374-53-30
e-mail: dream-journal@mail.ru
<http://dream-journal.org>

Главный редактор: Смирнов Сергей Витальевич, д.т.н.

Заместитель главного редактора: Сергей Викторович Гладковский, д.т.н.

Заместитель главного редактора: Евгений Юрьевич Просвиряков, д.ф.-м.н.

Редакционный совет:

Буренин Анатолий Александрович, член-корр. РАН, д.ф.-м.н. (Россия)
Горячева Ирина Георгиевна, академик РАН, д.ф.-м.н. (Россия)
Грум Янез, Ph.D, (Республика Словения)
Лебедев Михаил Петрович, член-корр. РАН, д.т.н. (Россия)
Леонтьев Леопольд Игоревич, академик РАН, д.т.н. (Россия)
Ломакин Евгений Викторович, член-корр. РАН, д.ф.-м.н. (Россия)
Матвеев Валерий Павлович, академик РАН, д.т.н. (Россия)
Махутов Николай Андреевич, член-корр. РАН, д.т.н. (Россия)
Морозов Никита Федорович, академик РАН, д.ф.-м.н. (Россия)
Москвичев Владимир Викторович, д.т.н. (Россия)
Панин Сергей Викторович, д.т.н. (Россия)
Фомин Василий Михайлович, академик РАН, д.ф.-м.н. (Россия)
Шао Вэнь-чжу, профессор (Китай)

Редакционная коллегия:

Артемьев Борис Викторович, д.т.н., (Москва)
Батаев Владимир Андреевич, д.т.н. (Новосибирск)
Батаев Иван Анатольевич, д.т.н. (Новосибирск)
Беляев Александр Константинович, член-корр. РАН, д.ф.-м.н., (Санкт-Петербург)
Буров Сергей Владимирович, к.т.н. (Екатеринбург)
Васьковский Владимир Олегович, д.ф.-м.н. (Екатеринбург)
Вичужанин Дмитрий Иванович, к.т.н. (Екатеринбург)
Дегтярь Владимир Григорьевич, академик РАН, д.т.н. (Миасс)
Емельянов Игорь Георгиевич, д.т.н. (Екатеринбург)
Задворкин Сергей Михайлович, к.ф.-м.н. (Екатеринбург)
Залазинский Александр Георгиевич, д.т.н. (Екатеринбург)
Коновалов Анатолий Владимирович, д.т.н. (Екатеринбург)
Костин Владимир Николаевич, д.т.н. (Екатеринбург)
Любимова Татьяна Петровна, д.ф.-м.н. (Пермь)
Макаров Алексей Викторович, член-корр. РАН, д.т.н. (Екатеринбург)
Мионов Владимир Александрович, д.м.н. (Екатеринбург)
Михайлов Сергей Анатольевич, член-корр. АН РТ, д.ф.-м.н., (Казань)
Мулюков Радик Рафикович, член-корр. РАН, д.ф.-м.н. (Уфа)
Муравьев Виталий Васильевич, д.т.н. (Ижевск)
Ничипурук Александр Петрович, д.т.н. (Екатеринбург)
Плехов Олег Анатольевич, член-корр. РАН, д.ф.-м.н. (Пермь)
Поволоцкая Анна Моисеевна, к.т.н. (Екатеринбург)
Пугачева Наталия Борисовна, д.т.н. (Екатеринбург)
Пышминцев Игорь Юрьевич, д.т.н. (Челябинск)
Ринкевич Анатолий Брониславович, член-корр. РАН, д.ф.-м.н. (Екатеринбург)
Саврай Роман Анатольевич, к.т.н. (Екатеринбург)
Смирнов Александр Сергеевич, к.т.н. (Екатеринбург)
Ульянов Александр Иванович, д.т.н. (Ижевск)
Худорожкова Юлия Викторовна, к.т.н. (Екатеринбург)

Верстакова Елена Евгеньевна – редактор перевода текста на английский язык
Верстакова Ольга Андреевна – редактор текста
Гариева Анна Валерьевна – верстальщик текста
Торлопова Галина Викторовна – помощник редактора
Шакиров Рауль Нурович, к.т.н. – администратор сайта журнала

Адрес редакции:

Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 34., ИМАШ УрО РАН
телефон: +7 (343) 375 35 83, факс +7 (343) 374-53-30
e-mail: dream-journal@mail.ru
http://dream-journal.org

CONTENTS

| | |
|--|----|
| Smirnov S. V., Veretennikova I. A., Konovalov D. A., Michurov N. S., Osipova V. A., and Pestov A. V. Effect of hardeners on the mechanical properties of epoxy coatings based on ED-20 resin | 6 |
| Struzhanov V. V. and Chaikin A. E. Fracture of a thin-walled spherical vessel affected by internal pressure | 17 |
| Khudorozhkova Yu. V., Zadvorkin S. M., Burov S. V., and Kamantsev I. S. Detection of prefracture zones in structural materials by magnetic and optical methods | 24 |
| Goruleva L. S. and Prosviryakov E. Yu. Exact solutions to the Navier–Stokes equations for describing inhomogeneous isobaric vertical vortex fluid flows in regions with permeable boundaries | 41 |
| Koroleva L. F., Savrai R. A., Prosviryakov E. Yu., Kostarev V. A., Pavlyshko S. V. and Kostarev P. V. The effect of abrasive additives on the tribotechnical properties of lubricants for the wheel–rail system | 54 |

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Смирнов С. В., Веретенникова И. А., Коновалов Д. А., Мичуров Н. С., Осипова В. А., Пестов А. В. Оценка влияния отвердителя на механические свойства эпоксидных покрытий на основе смолы ЭД-20 | 6 |
| Стружанов В. В., Чайкин А. Е. Разрушение тонкостенного сферического сосуда под действием внутреннего давления | 17 |
| Худорожкова Ю. В., Задворкин С. М., Буров С. В., Каманцев И. С. Обнаружение зон предразрушения в конструкционных материалах магнитными и оптическими методами | 24 |
| Горулева Л. С., Просвиряков Е. Ю. Точные решения уравнений Навье–Стокса для описания неоднородных изобарических вертикально завихренных течений жидкости в областях с проницаемыми границами | 41 |
| Королева Л. Ф., Саврай Р. А., Просвиряков Е. Ю., Костарев В. А., Павлышко С. В., Костарев П. В. Влияние добавок абразивного материала на триботехнические свойства смазки для системы «колесо–рельс» | 54 |

Received: 29.11.2022

Revised: 27.01.2023

Accepted: 28.02.2023

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.1.006-016

EFFECT OF HARDENERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COATINGS BASED ON ED-20 RESIN

S. V. Smirnov^{1, a)}, I. A. Veretennikova^{1, b), *}, D. A. Konovalov^{1, c)}, N. S. Michurov^{1, d)},
V. A. Osipova^{2, e)}, and A. V. Pestov^{2, f)}

¹*Institute of Engineering Science UB RAS,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*
²*I. Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis UB RAS,
22/20 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620137, Russia*

- a)  <https://orcid.org/0000-0002-2083-5377>  smirnov.sergy@bk.ru;
b)  <https://orcid.org/0000-0002-8371-7546>  stpxia@gmail.com;
c)  <https://orcid.org/0000-0002-5306-7765>  satterkein@yandex.ru;
d)  <https://orcid.org/0000-0003-1775-6181>  n.michurov@gmail.com;
e)  <https://orcid.org/0000-0001-7451-9428>  osipova.sva@gmail.com;
f)  <https://orcid.org/0000-0002-4270-3041>  pestov@ios.uran.ru

*Corresponding author. E-mail: stpxia@gmail.com

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia
Tel.: +7 (343) 375-3596; fax: +7 (343) 374-5330

The aim of this study is to investigate the mechanical properties of coatings based on ED-20 epoxy resin, manufactured with polyethylenepolyamine or polyamidepolyamine used as hardeners. Instrumented indentation with a Berkovich triangular pyramid is used to determine the mechanical properties. Indentation hardness, reduced elastic modulus, and creep at a given holding time are used as the characteristic parameters. The results testify that the mechanical properties of the epoxy coatings made with different hardeners differ significantly from each other and demonstrate different behaviors.

Keywords: polymer coating, hardener, hardness, creep.

Acknowledgment

The work was performed according to the state assignment for the IES UB RAS (theme No. AAAA-A18-118020790145-0) with the use of the equipment of the Plastometriya shared research facilities and according to the state assignment for the IOS UB RAS (theme No. AAAA-A19-119012290116-9) with the use of the equipment of the Spectroscopy and Analysis of Organic Compounds shared research facilities.

References

1. GOST 27037–86. Paint materials. Method for determination of stability to temperature changes. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200008357>
2. GOST 15140–78. Paintwork materials. Methods for determination of adhesion. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200004028>
3. GOST 6806–73. Paintwork materials. Method for determination of film elasticity in bending. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200019411>
4. GOST 4765–73. Paint and lacquer materials. Method for determination of impact resistance. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200019411>

5. ISO 14577–1:2002. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1: Test method (MOD). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200095901>
6. Oliver W.C., Farr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advanced in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, 2004, vol. 19, No. 1, pp. 73–78. DOI: 10.1557/jmr.2004.19.1.3.
7. Pugacheva N.B., Bykova T.M., Trushina E.B., Malygina I.Yu. The Structural State and Properties of a Deposited Coating for An Internal Combustion Engine Valve. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2018, iss. 5, pp. 74–85. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.5.074-085. Available at: [DREAM_Issue_5_2018_Pugacheva_N.B._et_al._074_085.pdf](#)
8. Markovets M.P. *Opredelenie mekhanicheskikh svoystv metallov po tverdosti* [Determination of the mechanical hardness properties of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 191 p. (In Russian).
9. Tunvisut K., O’Dowd N.P., Busso E.P. Use of scaling functions to determine mechanical properties of thin coatings from microindentation tests. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, vol. 38, pp. 335–351. DOI: 10.1016/S0020-7683(00)00017-2.
10. Bucaille J.L., Stauss S., Felder E., Michler J. Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, pp. 1663–1678. DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00568-2.
11. Ogasawara N., Chiba N., Xi Chen. Measuring the plastic properties of bulk materials by single indentation test. *Scripta Materialia*, 2006, vol. 54, pp. 65–70. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2005.09.009.
12. Taljat B., Zacharia T., Kozel F. New analytical procedure to determine stress-strain curve from spherical indentation data. *Int. J. Solid structures*, 1998, vol. 35, No. 33, pp. 4411–4426. DOI: 10.1016/S0020-7683(97)00249-7.
13. Smirnov S.V., Smirnov V.K., Soloshenko A.N., Shvejkin V.P. Determination of the yield stress on the results of the penetration of the conical indenter. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 2000, No. 3, pp. 3–6. (In Russian).
14. Kononov D.A., Golubkova I.A., Smirnov S.V. Determining the strength properties of individual layers of strained laminated composites by kinetic indentation. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, vol. 47, pp. 852–857. DOI: 10.1134/S1061830911120072.
15. Smirnov S.V., Smirnova E.O. A technique for determining coefficients of the “stress–strain” diagram by nanoscratch test results. *Journal of Materials Research*, 2014, vol. 29, iss. 16, pp. 1730–1736. DOI: 10.1557/jmr.2014.188.
16. Smirnov S.V., Smirnova E.O., Veretennikova I.A., Fomin V.M., Filippov A.A., Brusentseva T.A. Studying epoxy resin reinforced with silica dioxide nanoparticles by microindentation. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, iss. 1, pp. 24–35. DOI: 10.17804/2410-9908.2017.1.024-035. Available at: [DREAM_Issue_1_2017_Smirnov_S.V._et_al._024_035.pdf](#)
17. Smirnov S.V., Veretennikova I.A., Smirnova E.O., Pestov A.V. Estimating the effect of fillers on the mechanical properties of epoxy glue coating by microindentation. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, iss. 6, pp. 103–111. DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.103-111. Available at: [DREAM_Issue_6_2017_Smirnov_S.V._et_al._103_111.pdf](#)
18. Díez-Pascual Ana M., Gómez-Fatou Marián A., Ania Fernando, Flores Araceli. Nanoindentation in polymer nanocomposites. *Progress in Materials Science*, 2015, No. 67, pp. 1–94. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2014.06.002.
19. Oliveira G.L., Costa C.A., Teixeira S.C.S., Costa M.F. The use of nano- and micro-instrumented indentation tests to evaluate viscoelastic behavior of poly(vinylidene fluoride) (PVDF). *Polymer Testing*, 2014, No. 34, pp. 10–16. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2013.12.006.
20. Smirnov S.V., Veretennikova I.A., Smirnova E.O., Pestov A.V. Studying the Mechanical Properties of Epoxy Adhesive Coatings by Instrumented Indentation. *AIP Conference Proceedings*, 2019, No. 2176, pp. 020008. DOI: 10.1063/1.5135120.

21. Tager A.A. *Fiziko-khimiya polimerov* [Physical Chemistry of Polymers]. Moscow, Nauchnyi Mir Publ., 2007, 576 p. (In Russian).
22. Nielsen Lawrence E. *Mekhanicheskie svoystva polimerov i polimernykh kompozitsyi* [Mechanical properties of polymers and composites, Engl. transl.]. Khimiya Publ., 1978, 321 p. (In Russian).
23. Lipatov Yu.S. *Fiziko-himicheskie osnovy napolneniya polimerov* [Physical and chemical bases of filling polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1991, 257 p. (In Russian).
24. Yaltuk Yu.G., Abramova V.I., Ovchinnikova G.I., Suvorov A.L., and Dultseva L.D. *Plasticheskie Massy*, 1981, No. 1, pp. 29–31. (In Russian).
25. Smirnova E.O., Veretennikova I.A., Smirnov S.V., Pestov A.V., Konovalov D.A. Adhesive Characteristics of Epoxy Glue in Relation to the Microgeometry of the Substrate Surface. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2053, pp. 030066. DOI: 10.1063/1.5084427. Baldin K., Rukosuev A. *Obshchaya teoriya statistiki. Uchebnoe posobie* [General theory statistics: textbook]. Moscow, Dashkov i K^o Publ., 2010, 312 p. (In Russian).

Подана в журнал: 29.11.2022

УДК 620.178.152.341.4

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.1.006-016

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОТВЕРДИТЕЛЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СМОЛЫ ЭД-20



С. В. Смирнов^{1, а)}, И. А. Веретенникова^{1, б), *}, Д. А. Коновалов^{1, в)}, Н. С. Мичуров^{1, г)},
В. А. Осипова^{2, д)}, А. В. Пестов^{2, е)}



¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки



Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация



²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки



Институт органического синтеза имени И. Я. Постовского Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Софьи Ковалевской, 22/20, г. Екатеринбург, 620137, Российская Федерация



^{а)}  <https://orcid.org/0000-0002-2083-5377>  smirnov.sergiy@bk.ru;

^{б)}  <https://orcid.org/0000-0002-8371-7546>  stpxia@gmail.com;

^{в)}  <https://orcid.org/0000-0002-5306-7765>  satterkein@yandex.ru;

^{г)}  <https://orcid.org/0000-0003-1775-6181>  n.michurov@gmail.com;

^{д)}  <https://orcid.org/0000-0001-7451-9428>  osipova.sva@gmail.com;

^{е)}  <https://orcid.org/0000-0002-4270-3041>  pestov@ios.uran.ru

* Ответственный автор. Электронная почта: stpxia@gmail.com

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

Тел.: 8 (343) 375–35–96; факс: 8 (343) 374–53–30

Цель работы – исследование механических свойств покрытий из эпоксидной смолы ЭД-20, изготовленных с использованием в качестве отвердителей полиэтиленполиамина и полиамидополиамина. В качестве метода определения механических свойств выбрано индентирование трехгранной пирамиды Берковича. В качестве характеризующих параметров использовали твердость индентирования, приведенный модуль упругости и показатель ползучести при заданном времени выдержки. В результате было показано, что механические свойства покрытий на основе смолы ЭД-20, изготовленных с использованием различных отвердителей, существенно отличаются и демонстрируют разное поведение.

Ключевые слова: эпоксидные покрытия, отвердитель, твердость, ползучесть.

1. Введение

Органические полимерные материалы активно используются в современной промышленности, и с развитием науки и техники область их применения постоянно растет. При изготовлении различных конструкций и изделий из полимеров необходимо знать механические свойства используемых материалов и при этом обязательно учитывать нагрузки, которые будет испытывать готовое изделие. Механические свойства являются структурочувствительными, косвенно отражая изменение дефектности материала и его внутренней структуры при внешних механических воздействиях. При этом могут использоваться различные виды испытаний и характеристики механических свойств. В соответствии с ГОСТ 27037-86 [1] для количественной оценки устойчивости покрытий из полимерных органических материалов к воздействию переменных температур рекомендуется проводить механические испытания на адгезию по ГОСТ 15140-78 [2], на эластичность при изгибе – по ГОСТ 6806-73 [3], а на прочность при ударе – по ГОСТ 4765-73 [4]. Все эти испытания являются разрушающими и требуют значительных временных и трудовых затрат на их проведение. В отличие от перечисленных разрушающих методов испытаний, для проведения инструментального индентирования

по ГОСТ Р 8.748-2011 [5] не требуется специальных образцов, так как испытание осуществляется непосредственно на исследуемом покрытии. По результатам испытаний получают экспериментальные данные по твердости, приведенному модулю упругости и другим характеристикам [6, 7]. С использованием различных методик обработки диаграмм нагружения можно получить данные по сопротивлению деформации и ползучести [8–15], которые в дальнейшем могут быть использованы для моделирования и прогнозирования свойств изделий при моделировании конструкции. Исследования, проведенные разными авторами, показывают, что инструментальное индентирование является эффективным способом изучения механических свойств эпоксидных покрытий [16–19]. В работе [20] на примере покрытий из эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20, армированной наноразмерными оксидами, было установлено, что механические характеристики, полученные методом инструментального вдавливания, чувствительны к особенностям химического состава и супрамолекулярной структуры отвержденных эпоксидных материалов.

Процесс полимеризации, в результате которого материалы на основе эпоксидной смолы обретают твердое состояние, происходит только после соединения смолы и отвердителя [21]. Отвердители оказывают большое влияние на конечные свойства получаемого материала [22–24]. Целью данной работы являлось продолжение исследований методом индентирования по установлению влияния отвердителя на механические свойства эпоксидной смолы ЭД-20 [20, 25].

2. Материалы и оборудование

В работе исследовали два варианта эпоксидных покрытий на основе смолы ЭД-20 (ФКП «Завод им. Я. М. Свердлова»): композиции холодного отверждения 1 и 2 (далее К1 и К2), отвержденные с использованием полиэтиленполиами́на (ПЭПА) и полиамидополиами́на (ПАПА) соответственно (АО «ХИМЭКС Лимитед»). ПЭПА является продуктом олигомеризации этиленимина со средней молекулярной массой 200 г/моль, а ПАПА – производное ПЭПА, ацилированное высшими жирными кислотами. Отверждение проводили при 25 °С в течение 24 ч. В табл. 1 приведены основные характеристики компонентов и исследованных композиций. С учетом аминного числа отвердителя, в случае ПАПА использовали большее количество отвердителя. Определение содержания гель-фракции проводили по изменению массы отвержденных образцов до и после горячей экстракции ацетоном в течение 24 ч в аппарате Сокслета с дальнейшей сушкой образцов до постоянной массы при 25 °С.

В качестве подложки использовали пластины толщиной 3 мм, длиной 85 мм и шириной 30 мм, изготовленные из алюминий-магниевого сплава АМг6, с величиной шероховатости Ra=0,35 мкм, обеспечивающей максимальную адгезионную прочность покрытия [25]. Удаление оксидной пленки и достижение требуемой шероховатости достигалось путем фрезерования поверхности подложки. Толщина покрытия составила 200±20 мкм.

Таблица 1

Свойства отвердителей, состав адгезивных композиций на основе эпоксидной диановой смолы ЭД-20 и содержание гель-фракции в отвержденном материале

| Композиция | Отвердитель | Аминное число отвердителя, мг КОН/г | Массовое соотношение смола:отвердитель | Содержание гель-фракции, % |
|------------|---------------------------|-------------------------------------|--|----------------------------|
| К1 | Полиэтиленполиамин (ПЭПА) | 832 | 10:1 | 90,5 |
| К2 | Полиамидополиамин (ПАПА) | 270 | 10:3 | 90 |

Эксперименты по инструментальному индентированию были проведены на наноконплексе Hysitron TI 950 Triboindenter с использованием трехгранной пирамиды Берковича. Первичную обработку результатов испытаний осуществляли с помощью программного обеспечения прибора по методике Оливера–Фарра. Испытания на индентирование проводили на поверхности покрытия, не подвергнутой механическим воздействиям, что обеспечило отсутствие влияния дополнительной обработки на полученные результаты. Испытания осуществляли при температуре 24 ± 2 °С.

В качестве характеризующих параметров выбраны твердость индентирования H и приведенный нормальный модуль упругости E_r . В экспериментах для их определения использовали треугольный режим нагружения, когда происходит линейный рост нагрузки и разгрузки в течение заданного времени (рис. 1 а). Индентирование проведено при времени нагружения 5, 10, 20, 40, 60 и 80 с, а время разгрузки всегда составляло 20 с.

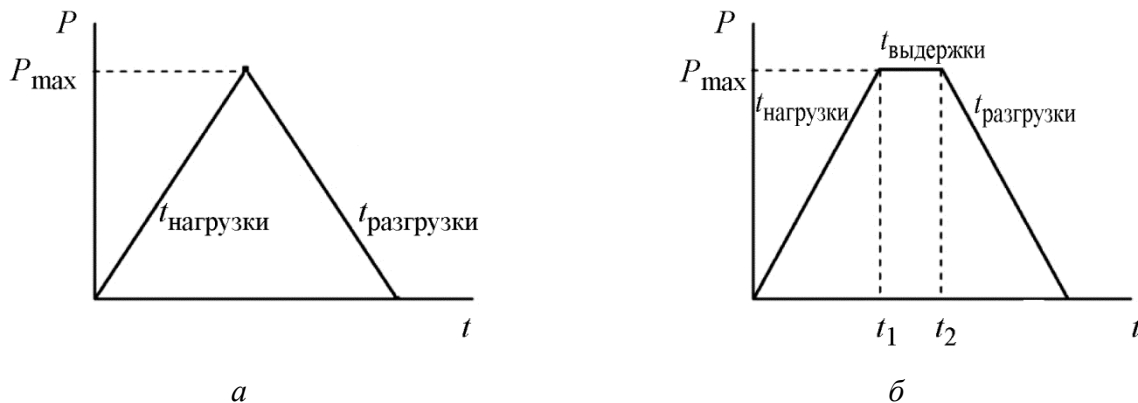


Рис. 1. Режимы нагружения: а – треугольный; б – трапецеидальный

В качестве характеристики ползучести материала покрытия при заданном времени выдержки и величине постоянной испытательной нагрузки использовали значение относительного изменения глубины индентирования

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} 100 \%,$$

где h_1 – глубина индентирования при достижении испытательной нагрузки, поддерживаемой постоянной с момента t_1 , мм; h_2 – глубина индентирования после выдержки под нагрузкой к моменту времени t_2 , мм. Схематически процесс нагружения приведен на рис. 1 б. Ползучесть материалов покрытий исследовали при временах выдержки 0, 20, 40, 60, 80 и 100 с при постоянной нагрузке 1 Н. Для каждого времени нагружения и выдержки было проведено по 5 испытаний.

В статистике одними из основных числовых характеристик измерения, отвечающими за разброс данных вокруг среднего значения (соответствующего математическому ожиданию) x , являются среднее квадратическое отклонение S и коэффициент вариации v [26]. Чем меньше эти значения, тем плотнее формируются результаты около среднего значения.

Среднее квадратическое отклонение определяется по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (1)$$

где x_i – экспериментально получаемые значения; n – количество наблюдений.

Коэффициент вариации определяется по формуле

$$v = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100 \% . \quad (2)$$

Также используется понятие «доверительный интервал» – статистическая оценка параметра исследуемого вероятностного распределения. При обработке экспериментальных данных для определения доверительного интервала используется соотношение вида

$$\bar{x} - \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot t_s \leq M_k \leq \bar{x} + \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot t_s , \quad (3)$$

где M_k – математическое ожидание; t_s – критерий Стьюдента. Табличный двусторонний критерий Стьюдента для четырех экспериментов равняется 3,1824 [26].

3. Анализ полученных результатов

Одним из аспектов исследования механических свойств является оценка параметров нагружения и их влияния на получаемые результаты. Ранее были выполнены работы по исследованию влияния времени нагружения на механические свойства эпоксидного материала после отвержения, и было принято решение остановиться на 50 с, поскольку в дальнейшем время нагружения при измерении твердости материала в эпоксидной смоле перестает оказывать существенное влияние на получаемые данные [16]. Однако отвердитель также может вносить вклад в изменение механических свойств материала, поэтому влияние времени нагружения в проведенных экспериментах требует уточнения. На рис. 2 приведены усредненные экспериментальные данные по твердости H . В табл. 2 приведены рассчитанные по формулам (1)–(3) математическое ожидание, квадратическое отклонение S , коэффициент вариации v и доверительный интервал для значений H .

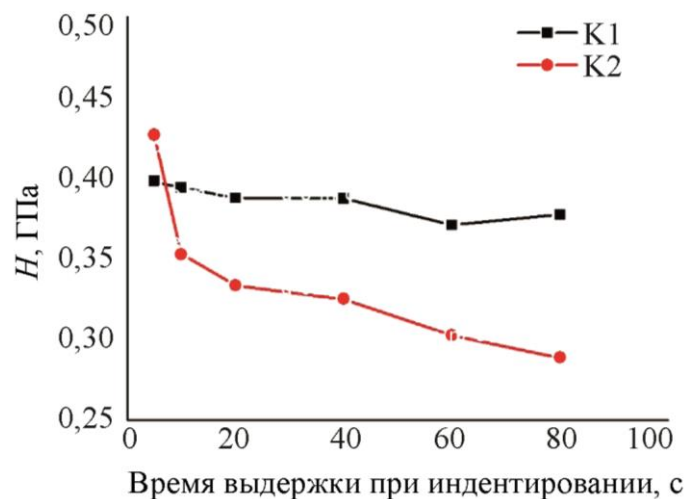


Рис. 2. Влияние времени нагружения на экспериментальные данные твердости H для исходных материалов на основе ЭД-20

Значение коэффициента вариации v для композиции K1 не превышает 2 % для всех времен нагружения. В свою очередь, для композиции K2 этот показатель варьируется от 1,44 до 8,79 %, что означает большую неоднородность получаемых экспериментальных данных. Время нагружения 5 и 10 с не рекомендуется применять при исследовании состава K2,

поскольку наблюдается большой разброс данных. В общем, полученные данные свидетельствуют о повторяемости экспериментальных результатов.

Таблица 2

Статистические результаты для данных по твердости

| Время нагружения, с | x | S | $v, \%$ | Доверительный интервал | x | S | $v, \%$ | Доверительный интервал |
|---------------------|---------------|--------|---------|------------------------|---------------|--------|---------|------------------------|
| | Композиция К1 | | | | Композиция К2 | | | |
| 5 | 0,4 | 0,0017 | 0,42 | 0,39×0,4 | 0,43 | 0,0375 | 8,79 | 0,37×0,49 |
| 10 | 0,39 | 0,0026 | 0,67 | 0,39×0,4 | 0,35 | 0,0219 | 6,21 | 0,32×0,39 |
| 20 | 0,39 | 0,0045 | 1,15 | 0,38×0,39 | 0,33 | 0,0048 | 1,44 | 0,33×0,34 |
| 40 | 0,39 | 0,007 | 1,81 | 0,38×0,4 | 0,33 | 0,0243 | 7,47 | 0,29×0,36 |
| 60 | 0,37 | 0,0031 | 0,84 | 0,37×0,38 | 0,3 | 0,0144 | 4,77 | 0,28×0,33 |
| 80 | 0,38 | 0,0037 | 0,98 | 0,37×0,38 | 0,29 | 0,0078 | 2,7 | 0,28×0,3 |

Наиболее стабильное поведение наблюдалось для покрытия К1, поскольку время индентирования практически не оказывает влияния на получаемые значения твердости, которые находятся в диапазоне погрешности измерения прибора $\pm \%$. Стабильное поведение подтверждает значительную активность отвердителя ПЭПА с высокой величиной аминного числа (табл. 1), обеспечивающей формирование прочной сетчатой надмолекулярной структуры покрытия.

Для исходного образца с покрытием К2 время нагружения является фактором, оказывающим существенное влияние на получаемые данные. Так, в диапазоне времени нагружения t_n от 5 до 40 с исходный образец с покрытием К2 проявляет вязкие свойства, выражающиеся в уменьшении твердости при увеличении времени нагружения. Изменение характера поведения покрытия при переходе от отвердителя ПЭПА к отвердителю ПАПА, по-видимому, обусловлено меньшей эффективностью в формировании сетчатой структуры из-за понижения аминного числа и пластифицирующим эффектом структурных фрагментов ПАПА. Меньшее значение аминного числа требует большего количества отвердителя, что приводит к увеличению степени пластификации материала и его нестабильному поведению при индентировании.

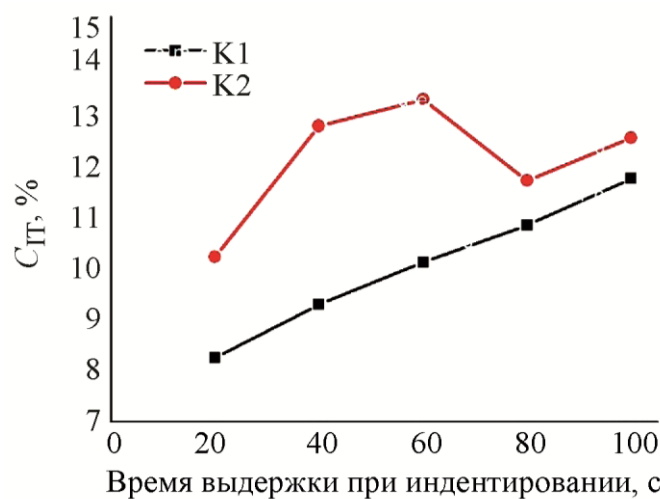


Рис. 3. Средние значения C_T в % для каждого образца при разных t_B

В результате было решено проводить испытания при времени нагружения 60 с. Твердость покрытия для состава К1 выше и составляет 0,37 ГПа; в свою очередь, твердость покрытия состава К2 – 0,3 ГПа. Значения модуля для составов покрытий К1 и К2 равны соответственно 6,2 и 5,1 ГПа. Большие значения твердости и модуля для состава покрытия К1 обусловлены большей реакционной способностью отвердителя ПЭПА по сравнению с отвердителем ПАПА, что обеспечивает более прочную сетчатую структуру материала.

Важным свойством, отвечающим за искажение геометрических размеров и снижение способности сопротивляться нагрузкам с течением времени, является ползучесть. На рис. 3 приведены средние значения C_T при разных значениях t_b .

Для образцов с покрытием состава К1 наблюдается плавный рост показателя ползучести. Для состава К2 наблюдается нестабильное изменение ползучести материала с увеличением времени выдержки под нагрузкой. Такое поведение покрытия К2, отличное от поведения покрытия К1, обусловлено пластифицирующим эффектом структурных фрагментов ПАПА.

4. Выводы

Использование полиэтиленполиамиона (К1) в качестве отвердителя приводит к более высокой прочности покрытия, чем использование полиамидополиамиона (К2), которая определяется по значению твердости и составляет соответственно 0,37 ГПа против 0,3 ГПа.

Статистический анализ проведенных испытаний показал, что композиции К1, изготовленные с использованием отвердителя полиэтиленполиамиона, отличаются стабильностью получаемых данных как по твердости, так и по ползучести, для экспериментальных данных возможно установить однозначные закономерности; композиции состава К2, изготовленные с отвердителем полиамидополиамином, демонстрируют нестабильность закономерностей изменения механических свойств.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790145-0 (с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН) и в рамках государственного задания ИОС УрО РАН по теме № АААА-А19-119012290116-9 (с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Спектроскопия и анализ органических соединений»).

Литература

1. ГОСТ 27037–86 (СТ СЭВ 5261–85). Материалы лакокрасочные. Метод определения устойчивости к воздействию переменных температур: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 21.10.86 N 3139: дата введения 1988-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200008357>
2. ГОСТ 15140–78. Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 18.05.78 N 1336: дата введения 1979-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004028>
3. ГОСТ 6806–73. Метод определения эластичности пленки при изгибе: введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 29 марта 1973 г. N 745: дата введения 1974-07-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200019411>
4. ГОСТ 4765–73. Материалы лакокрасочные. Метод определения прочности при ударе: введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 27.08.73 1973 г. N 2046: дата введения 01.07.74. – URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4294851/4294851550.pdf>
5. ГОСТ Р 8.748–2011 (ИСО 14577–1:2002). Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод

испытаний: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. N 1071-ст: дата введения 2013-05-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095901>

6. Oliver W. C., Farr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advanced in understanding and refinements to methodology // *Journal of Materials Research*. – 2004. – Vol. 19, No. 1. – P. 73–78. – DOI: 10.1557/jmr.2004.19.1.3.

7. The Structural State and Properties of a Deposited Coating for An Internal Combustion Engine Valve / N. B. Pugacheva, T. M. Bykova, E. B. Trushina, I. Yu. Malygina // *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2018. – Iss. 5. – P. 74–85. – DOI: 10.17804/2410-9908.2018.5.074-085. – URL: [DREAM_Issue_5_2018_Pugacheva_N.B._et_al_074_085.pdf](https://dream-journal.org/issue_5_2018_pugacheva_n.b._et_al_074_085.pdf)

8. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М. : Машиностроение, 1979. – 191 с.

9. Tunvisut K., O’Dowd N.P., Busso E.P. Use of scaling functions to determine mechanical properties of thin coatings from microindentation tests // *International journal of solids and structures*. – 2001. – Vol. 38. – P. 335–351. – DOI: 10.1016/S0020-7683(00)00017-2.

10. Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters / J. L. Bucaille, S. Stauss, E. Felder, J. Michler // *Acta materialia*. – 2003. – Vol. 51. – P. 1663–1678. – DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00568-2.

11. Ogasawara N., Chiba N., Xi Chen. Measuring the plastic properties of bulk materials by single indentation test // *Scripta materialia*. – 2006. – Vol. 54. – P. 65–70. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2005.09.009.

12. Taljat B., Zacharia T., Kozel F. New analytical procedure to determine stress-strain curve from spherical indentation data // *International Journal of Solids and Structures*. – 1998. – Vol. 35, No. 33. – P. 441–4426. – DOI: 10.1016/S0020-7683(97)00249-7.

13. Определение сопротивления деформации по результатам внедрения конического индентора / С. В. Смирнов, В. К. Смирнов, А. Н. Солошенко, В. П. Швейкин // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 2000. – № 8. – С. 3–6.

14. Konovalov D. A., Golubkova I. A., Smirnov S. V. Determining the strength properties of individual layers of strained laminated composites by kinetic indentation // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2011. – Vol. 47. – P. 852–857. – DOI: 10.1134/S1061830911120072.

15. Smirnov S. V., Smirnova E. O. A technique for determining coefficients of the “stress–strain” diagram by nanoscratch test results // *Journal of Materials Research*. – 2014. – Vol. 29, iss. 16. – P. 1730–1736. – DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2014.188>.

16. Studying epoxy resin reinforced with silica dioxide nanoparticles by microindentation / S. V. Smirnov, E. O. Smirnova, I. A. Veretennikova, V. M. Fomin, A. A. Filippov, T. A. Brusentseva // *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2017. – Iss. 1. – P. 24–35. – DOI: 10.17804/2410-9908.2017.1.024-035. – URL: [DREAM_Issue_1_2017_Smirnov_S.V._et_al_024_035.pdf](https://dream-journal.org/issue_1_2017_smirnov_s.v._et_al_024_035.pdf)

17. Estimating the effect of fillers on the mechanical properties of epoxy glue coating by microindentation / S. V. Smirnov, I. A. Veretennikova, E. O. Smirnova, A. V. Pestov // *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2017. – Iss. 6. – P. 103–111. – DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.103-111. – URL: [DREAM_Issue_6_2017_Smirnov_S.V._et_al_103_111.pdf](https://dream-journal.org/issue_6_2017_smirnov_s.v._et_al_103_111.pdf)

18. Nanoindentation in polymer nanocomposites / Díez-Pascual Ana M., Gómez-Fatou Marián A., Ania Fernando, Flores Araceli // *Progress in Materials Science*. – 2015. – No. 67. – P. 1–94. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2014.06.002.

19. The use of nano- and micro-instrumented indentation tests to evaluate viscoelastic behavior of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) / G. L. Oliveira, C. A. Costa, S. C. S. Teixeira, M. F. Costa // *Polymer Testing*. – 2014. – No. 34. – P. 10–16. – DOI: 10.1016/j.polymertesting.2013.12.006.

20. Studying the Mechanical Properties of Epoxy Adhesive Coatings by Instrumented Indentation / S. V. Smirnov, I. A. Veretennikova, E. O. Smirnova, A. V. Pestov // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – No. 2176. – 020008. – DOI: 10.1063/1.5135120.



21. Тагер А. А. Физико-химия полимеров. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Научный мир, 2007. – 576 с.
22. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций. – М. : Химия, 1978. – 321 с.
23. Липатов Ю. С. Физико-химические основы наполнения полимеров. – М. : Химия. – 1991. – 257 с.
24. Отверждение ЭТП-композиций в присутствии основных и кислых катализаторов / Ю. Г. Ятлук, В. И. Абрамова, Г. И. Овчинникова, А. Л. Суворов, Л. Д. Дульцева // Пластические массы. – 1988. – № 1. – С. 29–31.
25. Adhesive Characteristics of Epoxy Glue in Relation to the Microgeometry of the Substrate Surface / E. O. Smirnova, I. A. Veretennikova, S. V. Smirnov, A. V. Pestov, D. A. Kononov // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2053. – 030066. – DOI: 10.1063/1.5084427.
26. Балдин К., Рукосуев А. Общая теория статистики : учебное пособие. – М. : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2010. – 312 с.



Received: 21.11.2022
Revised: 18.01.2023
Accepted: 28.02.2023
DOI: 10.17804/2410-9908.2023.1.017-023

FRACTURE OF A THIN-WALLED SPHERICAL VESSEL AFFECTED BY INTERNAL PRESSURE

V. V. Struzhanov^{a), *} and A. E. Chaikin^{b)}

*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
 34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

^{a)}  <http://orcid.org/0000-0002-3669-2032>  stru@imach.uran.ru;

^{b)}  <http://orcid.org/0000-0001-5582-2384>  chaykin.ae@yandex.ru

*Corresponding author: E-mail: stru@imach.uran.ru

Address for correspondence: 34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia
 Tel.: +7 (343) 362-3019

A problem on the fracture of a thin-walled spherical vessel affected by increasing internal pressure is formulated. The material properties both in the stage of hardening and in the stage of softening (prefracture) are described. The mathematics of the catastrophe theory is used to write down the equilibrium equations and to find the critical value of pressure, at which the vessel fails.

Keywords: thin coatings, equilibrium state curves, loss of stability, fracture, Lamé problem.

Acknowledgment

The work was performed according to the state assignment, theme No. AAAA-A18-118020790145-0.

References

1. Vil'deman V.E., Chausov N.G. Conditions of strain softening upon stretching of the specimen of special configuration. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2007, vol. 73, No. 10, pp. 55–59. (In Russian).
2. Ipatova A.V., Vil'deman V.E. Construction of material functions of aluminum alloy D16T inelastic deformation based on the results of tests of tension and torsion. *Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 2012, iss. 4 (29), pp. 106–114. DOI: 10.14498/vsgtu1106. (In Russian).
3. Vil'deman V.E., Tretyakov M.P. Material testing by plotting total deformation curves. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2013, vol. 42, No. 2, pp. 166–170. DOI: 10.3103/S1052618813010159.
4. Mironov V.I. Properties of the material in rheologically unstable state. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2002, vol. 68, No. 10, pp. 47–52. (In Russian).
5. Arsenin V.Ya. *Metody matematicheskoy fiziki i spetsialnye funktsii [Methods of Mathematical Physics and Special Functions]*. Moscow, Nauka Publ., 1974, 286 p. (In Russian).
6. Struzhanov V.V. and Mironov V.N. *Deformatsionnoe razuprochnenie materiala v elementakh konstrutsiy [Deformational Softening of Material in Structural Elements]*. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 1995. (In Russian).
7. Struzhanov V.V., Korkin A.V. Regarding stretching process stability of one bar system with softening elements. *Vestnik Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putei Soobshcheniia*, 2016, No. 3 (31), pp. 4–17. DOI: 10.20291/2079-0392-2016-3-4-17. (In Russian).

8. Struzhanov V.V., Korkin A.V. A variant of the method of elastic solutions in the task on definition of balance of the stretched rod system with softening elements. *Herald of the Ural State University of Railway Transport (Scientific journal)*, 2018, No. 1 (37), pp. 11–19. DOI: 10.20291/2079-0392-2018-1-11-20. (In Russian).
9. Struzhanov V.V., Korkin A.V., Chaykin A.E. One approach to determination of the ultimate load-bearing capacity of mechanical systems with softening elements. *Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 2018, vol. 22, No. 4, pp. 762–773. DOI: 10.14498/vsgtu1624. (In Russian).
10. Struzhanov V.V. The determination of the deformation diagram of a material with a falling branch using the torsion diagram of a cylindrical sample. *Sib. Zh. Ind. Mat.*, 2012, vol. 15, No. 1, pp. 138–144. (In Russian).
11. Poston T., Stewart I. *Catastrophe Theory and Its Application*, London, Pitman Publ., 1978, 491 p.

Подана в журнал: 21.11.2022



УДК 539.3



DOI: 10.17804/2410-9908.2023.1.017-023

РАЗРУШЕНИЕ ТОНКОСТЕННОГО СФЕРИЧЕСКОГО СОСУДА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

В. В. Стружанов^{а)}, * , А. Е. Чайкин^{б)}

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация*

^{а)}  <http://orcid.org/0000-0002-3669-2032>  stru@imach.uran.ru;

^{б)}  <http://orcid.org/0000-0001-5582-2384>  chaykin.ae@yandex.ru

* Ответственный автор. Электронная почта: stru@imach.uran.ru
Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация
Тел.: +7 (343) 362–30–19

Сформулирована задача о разрушении тонкостенного сферического сосуда под действием возрастающего внутреннего давления. Описаны свойства материала как на стадии упрочнения, так и на стадии разупрочнения (предразрушения). С помощью аппарата математической теории катастроф выписаны уравнения равновесия и определено критическое значение давления, при достижении которого сосуд разрушается.

Ключевые слова: тонкое покрытия, кривые равновесных состояний, потеря устойчивости, разрушение, задача Ламе.

1. Введение

Сферические тонкостенные сосуды широко используются в промышленности, например, для хранения и транспортировки сжиженного газа. При этом они находятся под действием большого внутреннего давления. Их разрушение может привести к катастрофическим последствиям. При проектировании таких емкостей необходимо как можно более точно производить расчет на разрушение и определение величины критического внутреннего давления.

Максимально возможная точность расчета будет достигнута, если рассматривать разрушение как невозможность сохранения равновесия элементом конструкции под действием заданной нагрузки. Потеря равновесия происходит тогда, когда материал в некоторой совокупности отдельных областей конструктивного элемента переходит на закритическую стадию деформирования (стадию разупрочнения), на которой сопротивление самого материала является неустойчивым.

Разупрочнение неоднократно фиксировалось в экспериментах [1–4]. Однако учет таких состояний материала еще не нашел широкого применения в расчетах на прочность элементов конструкций из-за сложности построения модели материала, включающей описание поведения материала на стадии разупрочнения, и экспериментального определения параметров, входящих в модель. Кроме того, при использовании таких моделей возникают математические трудности, связанные с невыполнением условий Адамара [5], то есть полученные системы уравнений равновесия имеют неединственные и неустойчивые решения. Решены только некоторые задачи (например, [6–8]).

В данной работе предложена модель материала, учитывающая все стадии деформирования (в том числе и разупрочнение) при плоском напряженном состоянии элементов материала. Показано, как из простого эксперимента по кручению цилиндрического образца

с фиксированием стадии разупрочнения получить необходимые параметры для идентификации модели. Затем приведена методика определения предельного давления в толстостенных сферических сосудах. Использование предложенной модели материала позволило применить методы математической теории катастроф для решения сформулированной задачи.

2. Постановка задачи

Рассмотрим тонкостенную сферическую оболочку с внутренним радиусом b . Толщина оболочки $t \ll b$. Оболочка находится под действием квазистатически возрастающего внутреннего давления p . Температура постоянна. Требуется найти величину предельного давления p^* , при достижении которого происходит разрушение оболочки.

При возрастании давления до разрушения материал оболочки проходит все стадии деформирования, а именно упругость, упрочнение и разупрочнение.

Определим свойства материала оболочки на всех стадиях деформирования, включая и стадию разупрочнения. При пропорциональном нагружении для расчета напряженно-деформированного состояния, как правило, используется теория малых упруго-пластических деформаций. Однако ее первое положение о постоянстве объемного модуля на стадии разупрочнения не выполняется в силу наличия объемного разрушения материала. Вместо второго положения о пропорциональности девиаторов тензоров напряжений и деформаций будем сохранять пропорциональность полных тензоров напряжений и деформаций с некоторым переменным матричным коэффициентом, зависящим от деформаций. Это означает, что в области неупругости линии уровня функции потенциальной энергии подобны линиям уровня в области упругости [9]. В этом случае потенциал напряжений представляет собой выпукло-вогнутую функцию. В области выпуклости материал устойчив, в области вогнутости материал находится на стадии разупрочнения (неустойчив) [9].

Опираясь на рассуждения, приведенные выше, получаем для плосконапряженного состояния, в котором находятся элементы оболочки, следующие определяющие соотношения [9]:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix} = \psi(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \cdot \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \mu \\ \mu & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; σ_1 , σ_2 и ε_1 , ε_2 – соответственно напряжения и деформации в декартовой прямоугольной системе в плоском элементе, находящемся в условиях плосконапряженного состояния. Параметр ψ требует определения в эксперименте.

Для определения функции ψ используем линии уровня потенциальной энергии в области упругости, которые для плосконапряженного состояния определяются выражением

$$V^e(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = E[2 \cdot (1 - \mu^2)]^{-1} \cdot (\varepsilon_1^2 + 2\mu\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2^2).$$

Это центральные эллипсы на плоскости $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$. Теперь нужно только определить энергию деформаций для каждой такой линии в области неупругости.

Очевидно, что деформирование материала вдоль большой полуоси эллипса является чистым сдвигом ($\varepsilon_1 = \varepsilon$, $\varepsilon_2 = -\varepsilon$). Воспользуемся полной диаграммой кручения цилиндрического образца, из которой можно получить диаграмму с падающей ветвью на стадии разупрочнения поверхностного слоя при чистом сдвиге [10]. Пусть эта диаграмма аппроксимируется выражением $\tau = G \cdot (\gamma - 50\gamma^2)$. Здесь τ – касательное напряжение; γ – сдвиг; $G = \frac{E}{2 \cdot (1+\mu)}$ – модуль сдвига в упругости.

Тогда энергия деформаций, отвечающая линии уровня,

$$V = \int_0^\gamma \tau d\gamma = V^e \cdot \left(1 - \frac{100}{3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V^e}{G}}\right), \text{ где } V^e = \frac{1}{2} \cdot G\gamma^2 - \text{упругая энергия; } \gamma = \sqrt{\frac{2 \cdot V^e}{G}}.$$

Так как $\sigma_1 = \frac{dV}{d\varepsilon_1}$; $\sigma_2 = \frac{dV}{d\varepsilon_2}$, то из равенства (1) находим, что

$$\psi = 1 - 100 \cdot \sqrt{V^e \cdot \frac{1 + \mu}{E}}. \quad (2)$$

В сферической оболочке имеют место только деформации (плосконапряженное состояние) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_\theta = \varepsilon_\varphi$, тогда из формулы (2) находим, что $\psi = 1 - 100\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{1+\mu}{1-\mu}}$.

$$\text{Отсюда } \sigma_\theta = \sigma_\varphi = \sigma = \left(1 - 100\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{1+\mu}{1-\mu}}\right) \frac{E}{1-\mu} \varepsilon.$$

На рис. 1 показан качественный вид потенциала напряжений, полученного выше для плосконапряженного состояния. Отчетливо видны области выпуклости (упрочнение) и вогнутости (разупрочнения).

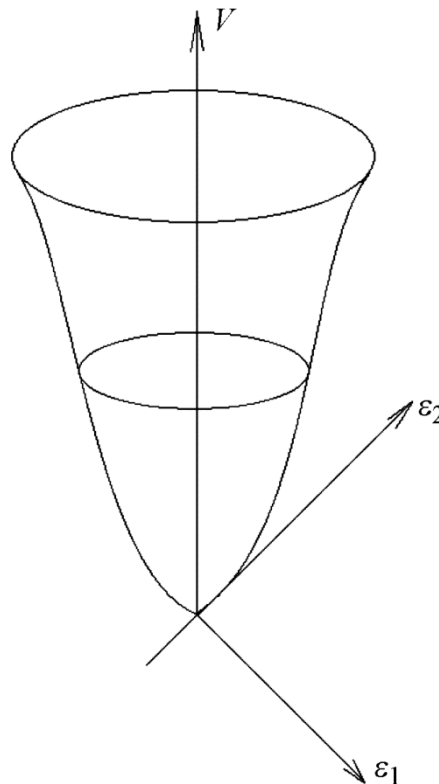


Рис. 1. Качественный вид потенциала напряжений

Уравнение равновесия

Выпишем лагранжиан системы, который при квазистатическом нагружении представляется в виде суммы потенциальной энергии деформаций сферической оболочки и работы внешних сил, взятой со знаком минус. Энергия элемента сферы равна

$$\frac{1}{2} \cdot (\sigma_{\theta}\varepsilon_{\theta} + \sigma_{\varphi}\varepsilon_{\varphi}) = \left(1 - 100\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{1+\mu}{1-\mu}}\right) \cdot \frac{E\varepsilon}{1-\mu} \varepsilon = \left(1 - 100\frac{v}{b} \cdot \sqrt{\frac{1+\mu}{1-\mu}}\right) \cdot \frac{E}{1-\mu} \frac{v^2}{b^2}.$$

Здесь v – радиальное перемещение точек внутренней поверхности сферы; $\varepsilon = \frac{v}{b}$. Тогда полная энергия (лагранжиан) системы есть функция

$$W = 4\pi b^2 t \left(1 - 100\frac{v}{b} \cdot \sqrt{\frac{1+\mu}{1-\mu}}\right) \cdot \frac{E}{1-\mu} \frac{v^2}{b^2} - 4\pi b^2 p v,$$

где $4\pi b^2 t$ – объем сферы; $4\pi b^2$ – площадь внутренней поверхности. Отметим, что перемещение v – это параметр состояния системы; внутреннее давление p – параметр управления системой. Теперь уравнение равновесия имеет следующий вид [11]:

$$\frac{dW}{dv} = \frac{2Etv}{b^2(1-\mu)} \left(1 - 150\frac{v}{b} \cdot \sqrt{\frac{1+\mu}{1-\mu}}\right) - p = 0. \quad (3)$$

Из уравнения (3) получаем связь между параметром управления и параметром состояния, а именно:

$$p = \frac{2Etv}{b^2(1-\mu)} \left(1 - 150\frac{v}{b} \cdot \sqrt{\frac{1+\mu}{1-\mu}}\right).$$

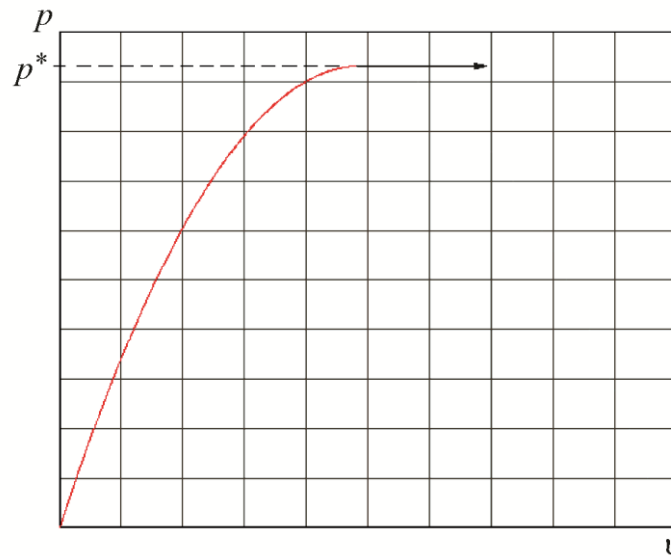


Рис. 2. Кривая равновесных состояний системы вплоть до разрушения

Определим максимум функции $p(v)$, после достижения которого произойдет разрушение оболочки. Имеем уравнение

$$\frac{dp}{dv} = \frac{2Et}{b^2(1-\mu)} \left(1 - 300\frac{v}{b} \cdot \sqrt{\frac{1+\mu}{1-\mu}}\right) = 0.$$

Отсюда находим координаты экстремальной точки:

$$v = \frac{b}{300} \sqrt{\frac{1+\mu}{1-\mu}}, p = \frac{Et}{300b} \sqrt{\frac{1}{1-\mu^2}}.$$

На рис. 2 приведена кривая равновесных состояний оболочки вплоть до разрушения.

Для численных значений $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $b = 10^{-2}$ м; $t = 10^{-3}$ м; $\mu = 0,3$. Предельное перемещение внутренней поверхности оболочки $v^* = 45 \cdot 10^{-6}$ м, предельное (разрушающее) давление $p^* = 70$ МПа.

3. Заключение

Предложена методика определения максимального разрушающего давления в тонкостенном сферическом сосуде. Она основывается на описании свойств материала с выпукловогнутой потенциальной энергией, учитывающим заключительную стадию деформирования (разупрочнение), с последующим использованием аппарата теории катастроф.

Благодарность

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием по теме № АААА-А18-118020790145-0.

Литература

1. Вильдеман В. Э., Чаусов Н. Г. Условия деформированного разупрочнения материала при растяжении образца специальной конструкции // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73, № 10. – С. 55–59.
2. Ипатов А. В., Вильдеман В. Э. Построение материальных функций неупругого деформирования алюминиевого сплава Д16Т по результатам испытаний на растяжение и кручение // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки. – 2012. – № 4 (29). – С. 106–114.
3. Vil'deman V. E., Tretyakov M. P. Material testing by plotting total deformation curves // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2013. – Vol. 42, No. 2. – P. 166–170. – DOI: 10.3103/S1052618813010159.
4. Миронов В. И. Свойства материала в реологически неустойчивом состоянии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2002. – Т. 68, № 10. – С. 47–52.
5. Арсенин В. Я. Методы математической физики и специальные функции. – М.: Наука, 1974. – 286 с.
6. Стружанов В. В., Миронов В. И. Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций. – Екатеринбург: УрО РАН, 1995. – 191 с.
7. Стружанов В. В., Коркин А. В. Об устойчивости процесса растяжения одной стержневой системы с разупрочняющимся элементом // Вестник Уральского гос. ун-та путей сообщения. – 2016. – № 3 (31). – С. 4–14.
8. Стружанов В. В., Коркин А. В. Один вариант метода упругих решений в задаче об определении положений равновесия растягиваемой стержневой системы с разупрочняющимися элементами // Вестник УрГУПС. – 2018. – № 1 (37). – С. 11–19.
9. Стружанов В. В., Коркин А. В., Чайкин А. Е. Об одном подходе к определению предельной несущей способности механических систем с разупрочняющимися элементами // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки. – 2018. – Т. 22, № 4. – С. 762–773.
10. Стружанов В. В. Определение диаграммы деформирования с падающей ветвью по диаграмме кручения цилиндрического образца // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2012. – Т. XV, № 1 (49). – С. 138–144.
11. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения / пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 608 с.

Received: 27.12.2022

Revised: 15.02.2023



Accepted: 28.02.2023



DOI: 10.17804/2410-9908.2023.1.024-040



DETECTION OF PREFRACTURE ZONES IN STRUCTURAL MATERIALS BY MAGNETIC AND OPTICAL METHODS



Yu. V. Khudorozhkova^{a),*}, S. M. Zadvorkin^{b)}, S. V. Burov^{c)}, and I. S. Kamantsev^{d)}

*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

a)  <https://orcid.org/0000-0003-3832-1419>  khjv@mail.ru;

b)  <https://orcid.org/0000-0002-7918-8207>  zadvorkin@imach.uran.ru;

c)  <https://orcid.org/0000-0002-0413-1054>  burchitai@mail.ru;

d)  <https://orcid.org/0000-0003-0775-4043>  ks@imach.uran.ru

*Corresponding author. E-mail: khjv@mail.ru

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia

Tel.: +7 (343) 362 3017

The study of the applicability of magnetic and optical methods to the detection of prefracture zones under fatigue degradation of structural materials is exemplified by the 09G2S steel. The regularities of changes in the signal of an attached fluxgate gradiometer with the increasing number of loading cycles have been revealed; namely, significant changes in the gradiometer readings on individual specimen surface areas prove to result from the formation of fracture zones. The change in the value of the coefficient of correlation among the speckle images is studied at different stages of cyclic testing. Speckle image heterogeneity is shown to appear due to fracture nucleation. Thus, the applicability of magnetic and speckle-interferometric methods to detecting prefracture zones in objects under cyclic loading is substantiated.

Keywords: magnetic state, flux gate, gradiometer, leakage field, speckle image, surface profile, cyclic testing, nondestructive testing, pipe steel.

Acknowledgment

The work was performed under the state assignment, theme No. AAAA-A18-118020790148-1. The study used the equipment of the Plastometriya shared research facilities.

We appreciate the assistance of Prof. A. P. Vladimirov, staff member of the laboratory of engineering diagnostics, IES UB RAS, who has developed the original procedure of dynamic optical speckle interferometry.

References

1. Panin V.E., Derevyagina L.S., Deryugin Ye.Ye., Panin A.V., Panin S.V., Antipina N.A. Prefracture stage mechanisms in physical mesomechanics. *Physical Mesomechanics*, 2003, vol. 6, No. 5–6, pp. 63–71. (In Russian).
2. Panin V.E. Overview on mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1998, vol. 30, No. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1016/S0167-8442(98)00038-X.
3. Gorkunov E.S. Magnetic Structural-Phase Analysis as Applied to Diagnosing and Evaluating the Lifetime of Products and Structural Components. Part 1. *Diagnostics, Resource and Mechanics*

- of materials and structures, 2015, iss. 1, pp. 6–40. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.1.006-040. Available at: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_1_2015_Gorkunov_E._S..pdf
4. Gilanyi A., Morishita K., Sukegawa T., Uesaka M., Miya K. Magnetic nondestructive evaluation of fatigue damage of ferromagnetic steels for nuclear fusion energy systems. *Fusion Engineering and Design*, 1998, vol. 42, iss. 1–4, pp. 485–491. DOI: 10.1016/S0920-3796(98)00180-X.
 5. Plekhov O.A., Pantelev I.A., and Leontiev V.A. Peculiarities of heat release and generation of acoustic emission signals in armco iron under cyclic deformation. *Fiz. Mezomekh.*, 2009, vol. 12, No. 5, pp. 37–43.
 6. Boulanger T., Chrysochoos A., Mabru C., Galtier A. Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels. *International Journal of Fatigue*, 2004, vol. 26, iss. 3, pp. 221–229. DOI: 10.1016/S0142-1123(03)00171-3.
 7. Palumbo D., Galietti U. Characterisation of steel welded joints by infrared thermographic methods. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2014, vol. 11 (1), pp. 29–42. DOI: 10.1080/17686733.2013.874220.
 8. Benaarbia A., Chrysochoos A., Robert G. In: *Photomechanics Conference: book of abstracts*, 25–27 May 2015, Delft, Netherlands, 2015, pp. 86–88.
 9. Gorkunov E.S., Mushnikov A.N. Magnetic methods of evaluating elastic stresses in ferromagnetic steels (review). *Kontrol'. Diagnostika* (“Testing. Diagnostics”), 2020, vol. 23, iss. 12, pp. 4–23. DOI: 10.14489/td.2020.12.pp.004-023 . (In Russian).
 10. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Dimitrov R. Application of magnetic methods for detection of localization zones of plastic deformation in structural steels. *Kontrol'. Diagnostika* (“Testing. Diagnostics”), 2017, iss. 1, pp. 12–15. DOI: 10.14489/td.2017.01.pp.012-015 . (In Russian).
 11. Wang Z.F., Li J., Ke W., Zhu Z. Characteristics of acoustic emission for A537 structural steel during fatigue crack propagation. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1992, vol. 27 (5), pp. 641–646. DOI: 10.1016/0956-716X(92)90354-H.
 12. Razumovsky Igor A. *Interference-Optical Methods of Solid Mechanics*, Springer–Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011.
 13. Vildeman V.E., Tretyakov M.P., Tretyakova T.V., Bulbovich R.V. et al. *Ekspperimentalnye issledovaniya svoistv materialov pri slozhnykh termomekhanicheskikh vozdeystviyakh* [Experimental Studies of the Properties of Materials under Complex Thermomechanical Processing]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 204 p. (In Russian).
 14. Gorkunov E.S. Magnetic Structural–phase Analysis. Part II. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015, iss. 3, pp. 6–50. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.006-050. Available at: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_3_2015_Gorkunov_E._S._006_050.pdf
 15. Murav’ev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V., and Kulikov V.A. An electromagnetic-acoustic method for studying stress-strain states of rails. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52 (7), pp. 370–376. DOI: 10.1134/S1061830916070044.
 16. Lasar J., Hola M., and Cip O. Differential interferometry for real-time measurement in high cycle fatigue metal testing. In: *Proceedings of the Conference PhotoMechanics : book of abstracts*, Delft University, Netherlands, 25–27 May 2015, pp. 64–65.
 17. Serbin Evgeny D., Kostin Vladimir N., Vasilenko Olga N., Ksenofontov Danila G., Gerasimov Evgeny G., Terentev Pavel B. Influence of the two-stage plastic deformation on the complex of the magnetoacoustic characteristics of low-carbon steel and diagnostics of its structural state. *NDT & E International*, 2020, vol. 116, article 102330. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102330.
 18. Vladimirov A.P. Dynamic speckle interferometry of microscopic and macroscopic processes in deformable media. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015, iss. 6, pp. 27–57. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.6.027-057. Available at: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_6_2015_Vladimirov_A.P._027_057.pdf
 19. Arutyunyan A.R., Zimin B.A., Sud'enkov Yu.V. The investigation of cyclic durability of construction materials by the method of optical-acoustic spectroscopy. *Vestnik Sankt-*

- Peterburgskogo Universiteta, Matematika, Mekhanika, Astronomiya*, 2008, No. 3, P. 88–96. (In Russian).
20. Ivanova V.S. *Razrushenie metallov* [Metal Destruction]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, 168 p. (In Russian).
 21. Botvina L.R. *Razrushenie: kinetika, mekhanizmy, obshchie zakonomernosti* [Destruction: Kinetics, Mechanisms, General Regulations]. Moscow, Nauka Publ., 2008. (In Russian).
 22. Terentyev V.F., Petukhov A.N. *Ustalost vysokoprochnykh metallicheskih materialov* [Fatigue of High Strength Metallic Materials]. Moscow, IMET RAS–ZIAM Publ., 2013, 515 p. (In Russian).
 23. Vinogradov A.Yu., Hashimoto S. Fatigue of ultrafine-grained materials produced by equal-channel angular pressing. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2004, No. 1, pp. 42–51.
 24. Nichipuruk A.P., Stashkov A.N., Kostin V.N., Korkh M.K. Possibilities of magnetic inspection of plastic deformations preceding failures of low-carbon steels constructions. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2009, vol. 45 (9), pp. 616–622.
 25. Terentyev V.F. *Ustalostnaya prochnost metallov i splavov* [Fatigue Strength of Metals and Alloys]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2002. (In Russian).
 26. Bida G.V., Nichipuruk A.P. *Magnitnye svoystva termoobrabotannykh staley* [Magnetic Properties of Heat-treated Steels]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2005. (In Russian).
 27. Gorkunov E.S., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Mushnikov A.N., Bazulin E.G., Vopilkin A.Kh. Some Features in the Behavior of Magnetic and Acoustic Characteristics of Hot-Rolled 08G2B Steel under Cyclic Loading. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, vol. 55, No. 11, pp. 827–836. DOI: 10.1134/S1061830919110044.
 28. Gorkunov E.S., Savrai R.A., Makarov A.V., Zadvorkin S.M. Magnetic Techniques for Estimating Elastic and Plastic Strains in Steels under Cyclic Loading. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015, iss. 2, pp. 6–15. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.2.006-015. Available at: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_2_2015_Gorkunov_E.S._et_al._6_15.pdf
 29. Gorkunov E.S., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Mushnikov A.N. The Effect of Cyclic Preloading on the Magnetic Behavior of the Hot-Rolled 08G2B Steel Under Elastic Uniaxial Tension. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2021, vol. 32, No. 6, pp. 276–294. DOI: 10.1080/09349847.2021.2002487.
 30. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Mushnikov A.N., Smirnov S.V., Yakushenko E.I. Effect of mechanical stresses on the magnetic characteristics of pipe steel. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2014, vol. 55 (3), pp. 530–538. DOI:10.1134/S002189441403016X.
 31. Mushnikov A.N., Putilova E.A., Povolotskaya A.M., Goruleva L.S. Effect of plastic deformation on the structure and magnetic properties of hull steel. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, 2022, No. 11 (809), pp. 3–10. DOI: 10.30906/mitom.2022.11.3-10. (In Russian).

Подана в журнал: 27.12.2022








УДК 620.179.143

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.1.024-040

ОБНАРУЖЕНИЕ ЗОН ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ МАГНИТНЫМИ И ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Ю. В. Худорожкова^{а),*}, С. М. Задворкин^{б)}, С. В. Буров^{в)}, И. С. Каманцев^{г)}

*Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация*

- ^{а)}  <https://orcid.org/0000-0003-3832-1419>  khjv@mail.ru;
^{б)}  <https://orcid.org/0000-0002-7918-8207>  zadvorkin@imach.uran.ru;
^{в)}  <https://orcid.org/0000-0002-0413-1054>  burchitai@mail.ru;
^{г)}  <https://orcid.org/0000-0003-0775-4043>  ks@imach.uran.ru

* Ответственный автор. Электронная почта: khjv@mail.ru

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

Тел.: +7 (343) 362–30–17

На примере стали 09Г2С изучены возможности магнитных и оптических методов обнаружения зон предразрушения при усталостной деградации конструкционных материалов. Выявлены закономерности изменения сигнала приставного феррозондового градиентометра с ростом числа циклов нагружения, а именно, установлено, что значительные изменения показаний градиентометра на отдельных участках поверхности исследованных образцов обусловлены формированием очагов разрушения. Исследовано изменение величины коэффициента корреляции спекловых изображений на разных стадиях циклических испытаний. Показано, что возникновение неоднородности на картине спекловых изображений связано с зарождением очага разрушения. Таким образом, обоснована возможность использования магнитных и спекл-интерферометрических методов для обнаружения зон предразрушения при циклическом нагружении объектов.

Ключевые слова: магнитное состояние, феррозонд, градиентометр, поле рассеяния, спекловое изображение, профиль поверхности, циклические испытания, неразрушающий контроль, трубная сталь.

1. Введение

Оценка текущего состояния и определение остаточного ресурса материала является актуальной проблемой и носит как фундаментальный, так и прикладной характер. Процесс разрушения материала в общем случае является многоуровневым. При любом виде разрушения стадии зарождения трещины предшествует стадия локальной пластической деформации в зоне макроконцентратора напряжений, а необходимым условием зарождения и распространения магистральной трещины является развитие макролокализации пластической деформации по всему сечению образца [1, 2]. Остаточные напряжения, суммируясь с напряжениями, возникающими в процессе эксплуатации, могут приводить к образованию зон предразрушения и формированию трещин. В настоящее время для изучения процессов разрушения материала применяют различные физические методы исследования [3–10]. Активно используют методы акустической эмиссии и дифференциальной интерферометрии [11–19]. Результаты исследований многоциклового усталости свидетельствуют о том, что в процессе многоциклового нагружения в металлах и сплавах происходят существенные микроструктурные изменения, связанные с дислокационной

структурой [20–23]. Возможности использования различных физических методов для изучения процессов зарождения и роста усталостной трещины, в том числе без остановки циклического нагружения, показаны в работах [4, 5].

Несмотря на широкое применение физических методов неразрушающего контроля для изучения усталостной прочности конструкционных материалов, исследователи сталкиваются с трудностями при создании устройств и методик, позволяющих без остановки процесса нагружения обнаруживать области возникновения признаков необратимых процессов в материале и изучать их развитие в реальном времени [24].

Одной из основных целей исследования была отработка методики изучения магнитного состояния испытуемого материала в процессе статического или циклического нагружения.

2. Образцы и методика исследований

Для определения возможностей физических неразрушающих методов по обнаружению зон предразрушения при циклическом одноосном растяжении изготовили плоские разрывные образцы с головками из отожженной стали 09Г2С с U-образными надрезами посередине рабочей части. Нанесенные на образцы надрезы позволили локализовать место зарождения усталостной трещины и ограничить область для проведения исследований. Начальная рабочая длина образцов составляла 80 мм. Сечение рабочей части образца вне надрезов составляло $16 \times 4 \text{ мм}^2$, а в области надрезов – $6 \times 4 \text{ мм}^2$. Эскиз образца приведен на рис. 1. Предварительными механическими испытаниями было установлено, что для исследованных образцов физический предел текучести $\sigma_T = 350 \text{ МПа}$, $\sigma_B = 500 \text{ МПа}$. Соответствующая диаграмма «напряжение – деформация» приведена на рис. 2.

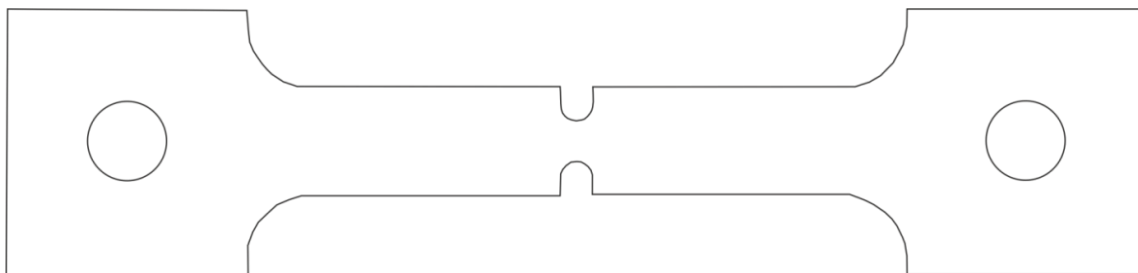


Рис. 1. Эскиз образца из стали 09Г2С с U-образными надрезами на боковых поверхностях рабочей части для статических и циклических испытаний на одноосное растяжение

Для исследования магнитного состояния образцов из стали 09Г2С в процессе статического или циклического нагружения специально сконструировали и изготовили градиентометры, регистрирующие разность индукции магнитных полей рассеяния на гладком, недеформируемом в процессе испытаний участке рабочей части образца и в области минимального сечения. Градиентометр представляет собой два одинаковых феррозонда, включенных встречно-последовательно. Каждый феррозонд состоит из сердечника диаметром 0,2 мм, длиной 10 мм из пермаллоя 80НХС с двумя обмотками из медного провода диаметром 0,08 мм; одна из них, обмотка возбуждения, содержит 150 витков, а вторая, измерительная, – 200 витков.

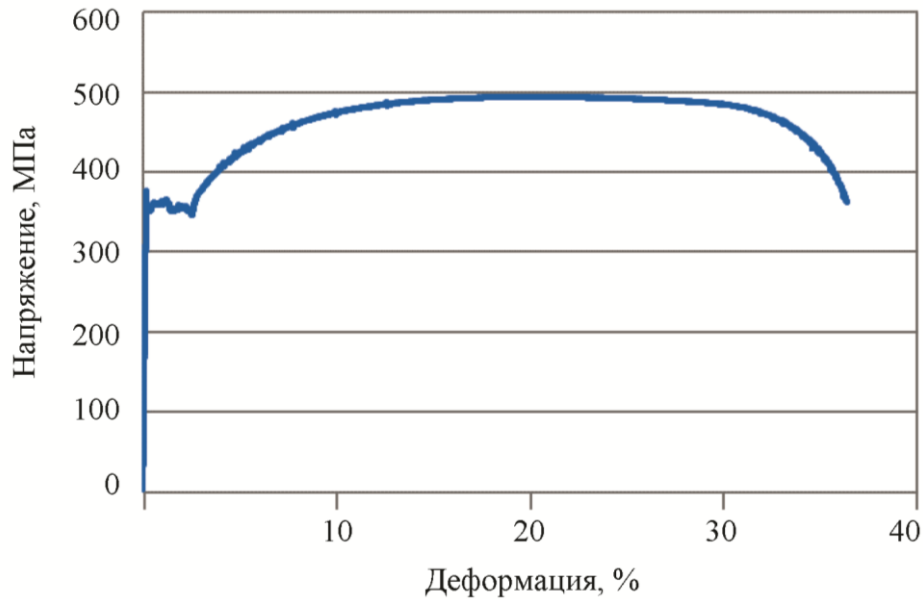


Рис. 2. Диаграмма «напряжение–деформация» отожженной стали 09Г2С

Были изготовлены градиентометры двух типов: один для размещения на фронтальной поверхности образца, а другой – на боковой поверхности. В градиентометре, размещаемом на боковой поверхности образца, один из феррозондов находится в середине надреза, а второй, формирующий опорный сигнал градиентометра, – на боковой поверхности рабочей части образца на удалении 20 мм от середины надреза. В градиентометре, размещаемом на фронтальной поверхности образца, один из феррозондов находится в центре, в области минимального сечения, а второй – на гладкой части образца на удалении 20 мм от середины U-образного надреза. Конструкция градиентометров обеспечивала их единообразную установку на образцы при испытаниях. На обоих градиентометрах феррозонды расположены перпендикулярно поверхностям образца. Градиентометры в сборе показаны на рис. 3. Перед проведением испытаний образцы размагничивали.

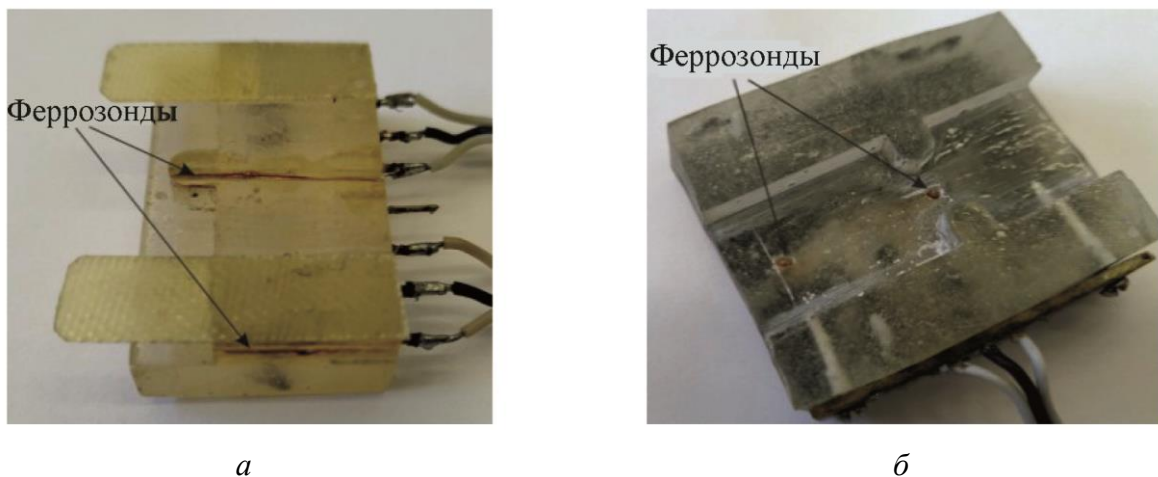


Рис. 3. Феррозондовый градиентометр в сборе: *а* – для размещения на боковой поверхности образца (торцевой); *б* – для размещения на рабочей поверхности образца (фронтальный)

Циклические испытания проведены на высокочастотной испытательной машине Mikrotron (RUMUL) с постоянным максимальным усилием цикла при частоте нагружения 103 Гц. Нагружение выполнялось по схеме «растяжение-растяжение» с коэффициентом

асимметрии $R = 0,05$ со свободным закреплением головок (на шарнирах) и максимальным усилием в цикле 7874 Н, что соответствует максимальному напряжению цикла 300 МПа. Предварительно размагниченный образец подвергался циклическому нагружению, остановки проводили при числе циклов 1128, 5000, 10 000, 50 000, 309 000, 320 000. По достижению каждой из указанных выше величин нагружение останавливали и проводили регистрацию показаний градиентометра, после чего возобновляли процесс нагружения.

Схема размещения градиентометров во время проведения эксперимента приведена на рис. 4. Из этого рисунка видно, что при проведении экспериментов показания градиентометров регистрировали при их расположении на обеих фронтальных и обеих боковых сторонах образцов, а также при размещении феррозондов, формирующих опорные сигналы градиентометров, по обе стороны от U-образных надрезов.

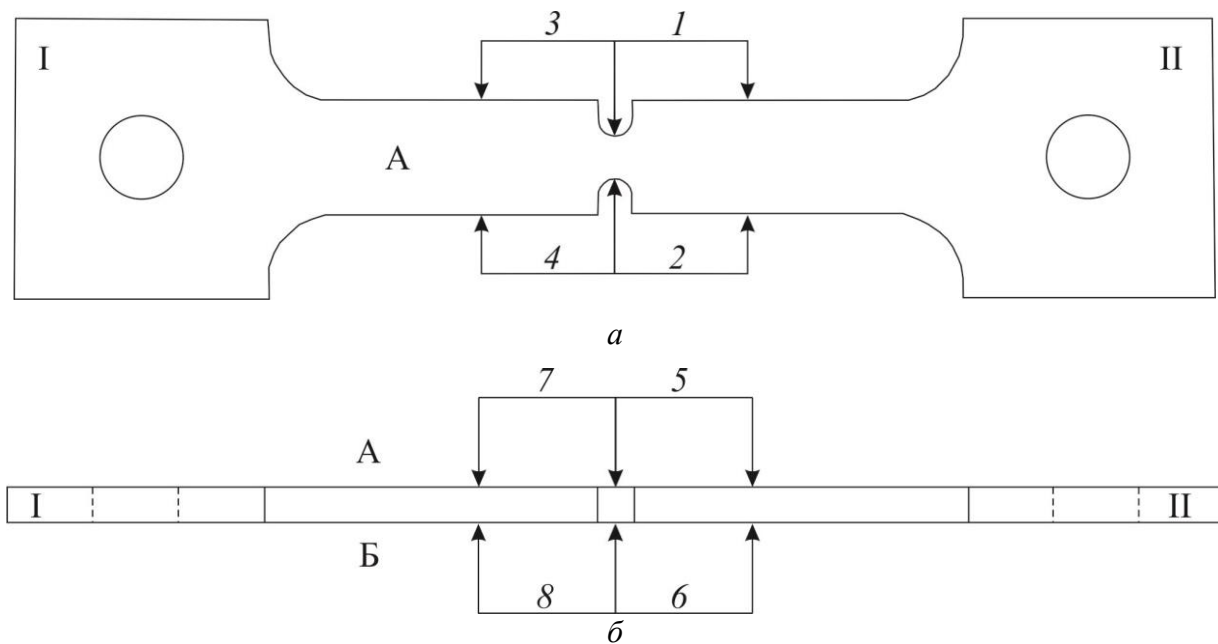


Рис. 4. Схема расположения градиентометров во время проведения эксперимента:
а – для размещения на боковой поверхности рабочей части образца; *б* – для размещения на фронтальной поверхности рабочей части образца. Цифрами отмечены положения градиентометра при регистрации показаний в процессе эксперимента

Головка образца, помеченная цифрой I, размещалась в верхнем захвате испытательной машины, цифрой II – в нижнем.

Определение топографии поверхности образцов проводилось с использованием оптического профилометра Wyko NT 1100. Профилометр позволяет проводить исследования рельефа поверхности с увеличением от $\times 1,25$ до $\times 100$ в поле зрения от 50 мкм до 4,95 мм при диапазоне измерения по вертикали от 160 нм до 2 мм и разрешении менее 0,1 нм.

Статические механические испытания на одноосное растяжение проводили на гидравлической испытательной машине Tinius Olsen Super L60 со скоростью перемещения активного захвата 0,5 мм/мин.

Химический состав исследуемой стали марки 09Г2С, масс. %

| Элемент | C | Si | Mn | Cr | Ni | Cu | Al | Fe |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Содержание | 0,073 | 0,680 | 1,110 | 0,066 | 0,061 | 0,125 | 0,039 | Основа |

Химический состав стали, определенный на установке Spectromaxx, приведен в таблице.

Контроль изменения рельефа боковой поверхности, вызванного формированием локализованной зоны пластической деформации, выполнен с использованием методики на основе лазерной динамической спекл-интерферометрии. Оптическая система, использованная для формирования спеклов, располагалась рядом с испытательной машиной. Образец освещали лазерным модулем с длиной волны $\lambda = 650$ мкм, мощностью 20 мВт по нормали к поверхности. В системе координат, в которой ось oy параллельна оси образца, а ось oz совпадает с нормалью поверхности, углы между направлением освещения и осями ox , oy и oz равнялись 6, 10 и 76 градусам соответственно. Для регистрации кадров спекловых изображений объекта использовали монохромную камеру типа Видеоскан 451М. Время экспонирования кадра соответствовало 50 циклам нагружения. Разработанная оригинальная методика динамической лазерной спекл-интерферометрии позволяет проводить регистрацию спекловых изображений без остановки усталостных испытаний.

3. Результаты и их обсуждение

При проведении циклических испытаний на высокочастотной резонансной испытательной машине Mikrotron (RUMUL) регистрировали частоту нагружения, уменьшение которой свидетельствует о появлении очага разрушения. На рис. 5 приведена зависимость изменения частоты от количества циклов нагружения.

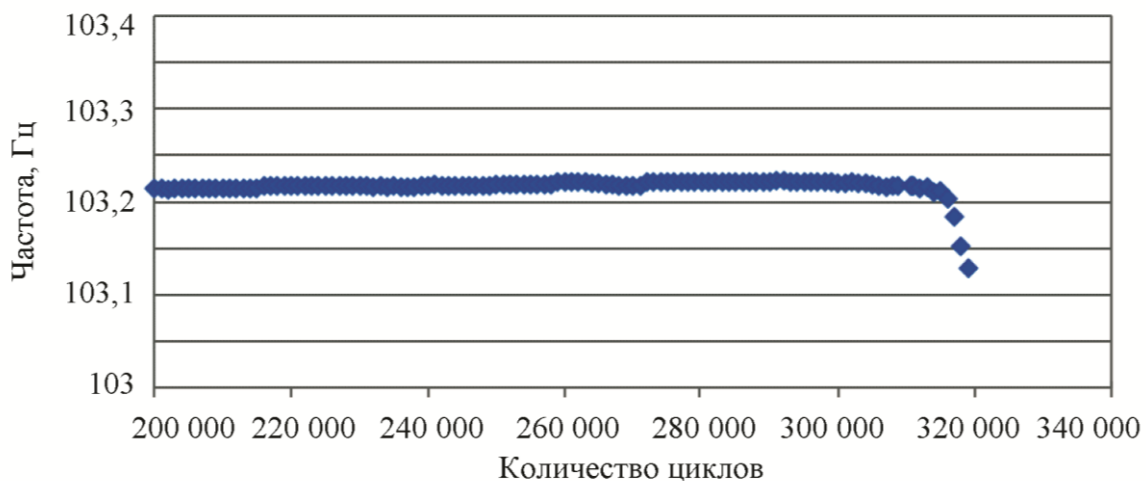


Рис. 5. Зависимость частоты нагружения от количества циклов

Как видно, при достижении примерно 314 000 циклов нагружения резонансная частота начинает уменьшаться. При этом микроскопическими исследованиями было зафиксировано образование полос скольжения в области минимального сечения рабочей части образца. По достижении 319 000 циклов нагружения испытания остановили. Визуальным осмотром вблизи середины одного из U-образных надрезов была обнаружена трещина длиной около 3 мм и раскрытием 0,156 мм. Трещина обнаружена на стороне А и не выходит на сторону Б (см. рис. 4). Структура поверхности образца после циклических испытаний показана на рис. 6.

Следует отметить, что трещина захватывает практически всю боковую поверхность одного из надрезов, но не доходит и до середины фронтальной поверхности А образца.

Регистрация спекловых изображений в процессе циклических испытаний производилась при наблюдении за поверхностью Б образца (рис. 4), то есть со стороны, противоположной появлению трещины. Спекловое изображение участка образца и распределения величины коэффициента корреляции спекловых изображений η на разных стадиях циклических испытаний приведены на рис. 7. Методика расчета η приведена в работе [18].

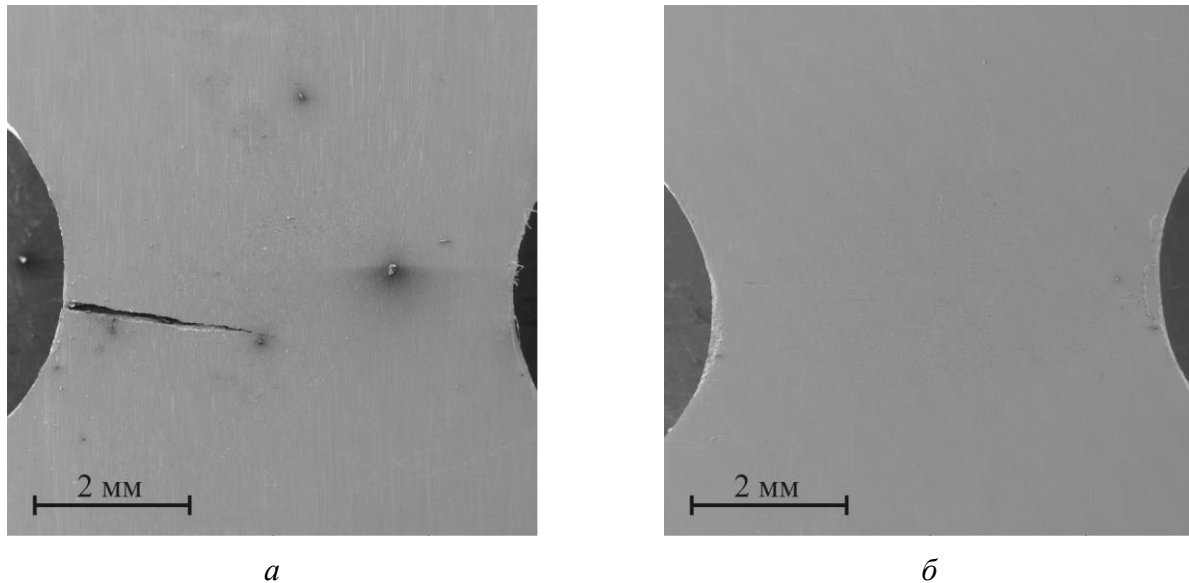


Рис. 6. Структура поверхности образца стали 09Г2С в области U-образных надрезов после циклических испытаний: *а* – сторона А; *б* – сторона Б

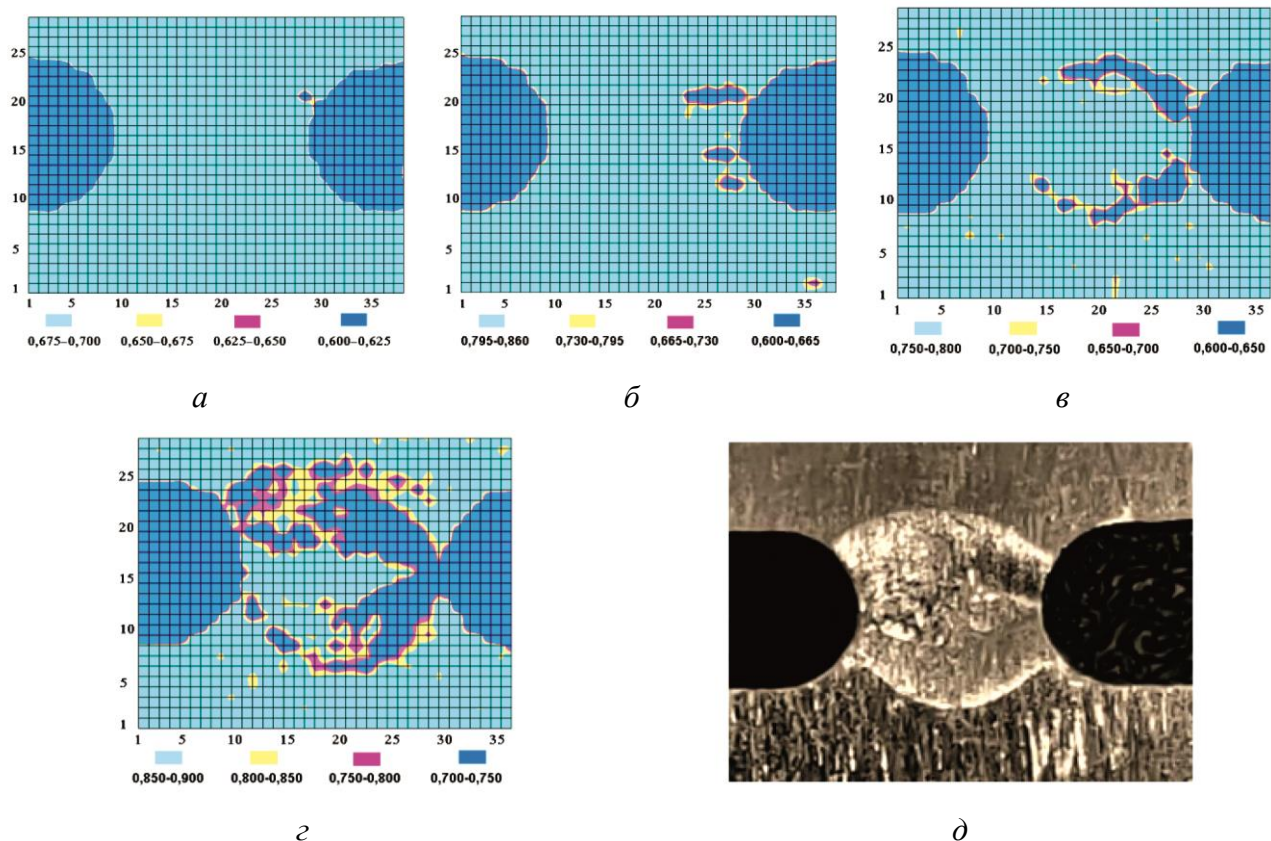


Рис. 7. Распределения величины коэффициента корреляции спекловых изображений η после 296 000 циклов нагружения (*а*), после 308 000 циклов нагружения (*б*), после 315 000 циклов нагружения (*в*), после 319 000 циклов нагружения (*г*), а также фотография зоны усталостного повреждения образца после 319000 циклов нагружения (*д*). Цветом обозначены диапазоны величин коэффициента корреляции спекловых изображений

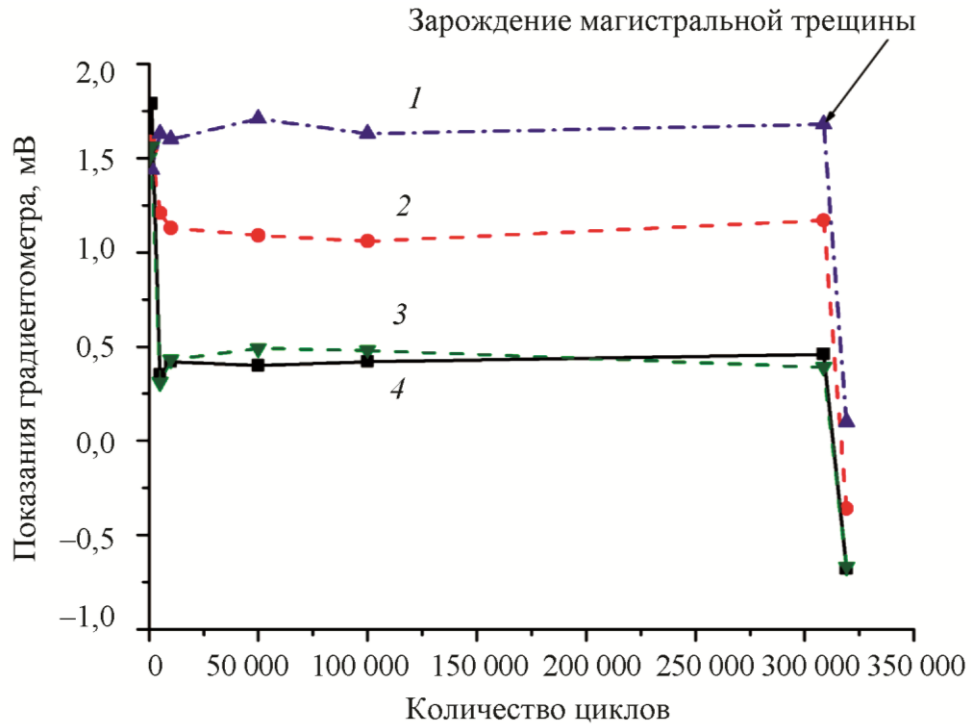
Регистрируемое снижение частоты нагружения произошло при 314 000 циклов нагружения. По достижении примерно 300 000 циклов на картине спекловых изображений была зафиксирована неоднородность, которую можно объяснить началом формирования полос скольжения. Следует отметить, что появление этой неоднородности произошло до заметного уменьшения частоты нагружения, свидетельствующего о зарождении очага разрушения и зафиксированного при микроскопическом исследовании полос скольжения по достижении 309 000 циклов. Это может свидетельствовать о большей чувствительности лазерной спеклинтерферометрии к усталостной деградации материала. После 309 000 циклов начались существенные изменения в картине спеклов, связанные с появлением множественных полос скольжения и последующим образованием и развитием усталостной трещины.

Кривые зависимостей показаний градиентометра от количества циклов нагружения для бокового и фронтального размещения градиентометров приведены на рис. 8. Цифрами на графике отмечены положения градиентометров (рис. 4) при регистрации показаний в процессе эксперимента. Разница показаний сигналов градиентометров при различном расположении их «опорных» феррозондов может быть обусловлена асимметрией ферромагнитных масс системы «испытательная машина – образец». Как видно из рис. 8, появление полос скольжения и последующей усталостной трещины приводит к значительному изменению показаний градиентометров.

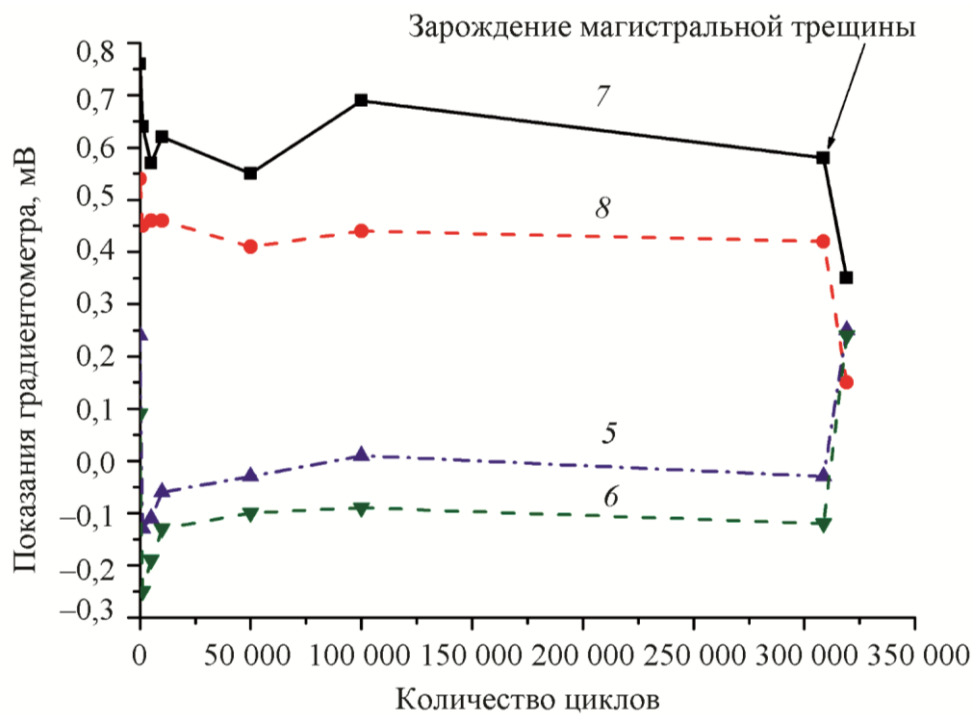
Показания градиентометра, расположенного на боковой поверхности образца, уменьшаются при всех вариантах его размещения, что можно объяснить увеличением дефектности структуры, сопровождающимся появлением полос скольжения и, соответственно, магнитных полей рассеяния. Тем самым нивелируется влияние разности площади сечений образца в местах расположения «опорного» феррозонда и феррозонда, расположенного в области минимального сечения образца в центре U-образных надрезов.

Результаты оптической профилометрии образца в исходном состоянии и после 319 000 циклов отнулевого растяжения приведены на рис. 9 для стороны с усталостной трещиной (сторона А на рис. 4) и на рис. 10 для стороны без трещины (сторона Б на рис. 4).

Согласно данным оптической профилометрии, перепад высот на поверхности сторон исследуемого образца в исходном состоянии не превышает 10 мкм на базе 18 мм. После проведения усталостных испытаний на обеих сторонах образца в области наименьшего сечения наблюдаются изменения рельефа поверхностей в виде «утяжек» со средним уменьшением толщины образца примерно на 0,14 мм. Таким образом, наименьшее сечение рабочей части образца после испытания уменьшилось почти на 4 %. Это изменение рельефа свидетельствует о пластической деформации данного участка образца. Причем зона пластической деформации имеет четкие границы с обеих сторон образца. Следует отметить, что по краям усталостной трещины на стороне А (рис. 4) не наблюдается изменений рельефа поверхности, в то время как с противоположной стороны образца (под трещиной) эти изменения максимальны, так что глубина выемки достигает 80 мкм. Вблизи вершины трещины также находится зона со значительным изменением рельефа поверхности диаметром около 4 мм и глубиной около 60 мкм. Такое поведение материала при циклической нагрузке вероятно обусловлено достижением циклического предела текучести [25]. Данные оптической профилометрии, представленные на рис. 10, коррелируют с распределением величины коэффициента корреляции спекловых изображений η после 319 000 циклов нагружения на рис. 7.



a



б

Рис. 8. Зависимости показаний градиентометров от количества циклов нагружения:
a – при размещении градиентометра на боковой поверхности образца;
б – при фронтальном расположении градиентометра

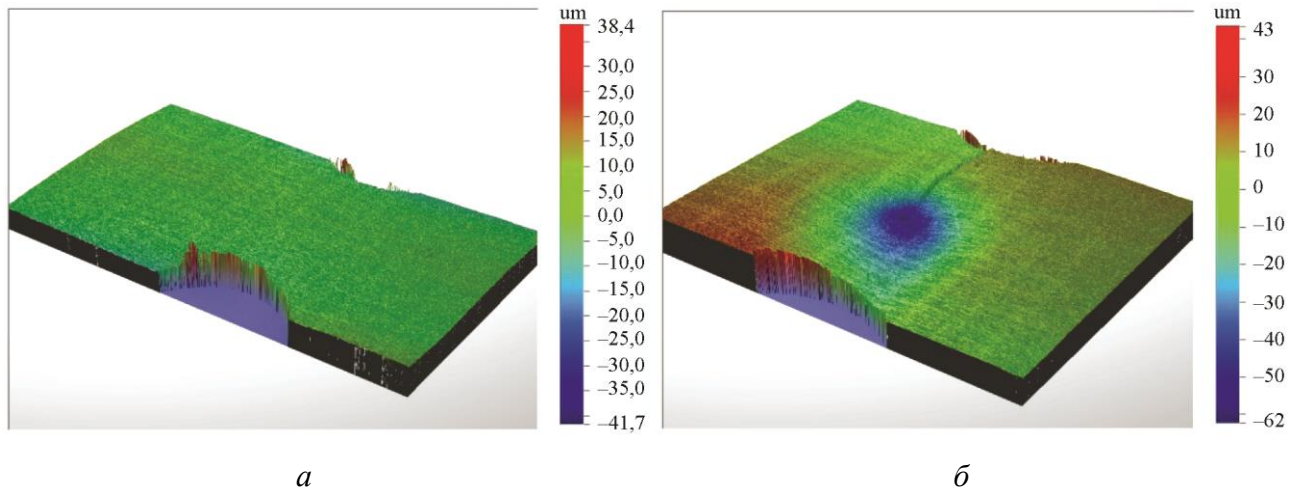


Рис. 9. 3D-профиль поверхности образца стали 09Г2С в области U-образных надрезов (сторона А): *а* – до циклических испытаний; *б* – после циклических испытаний

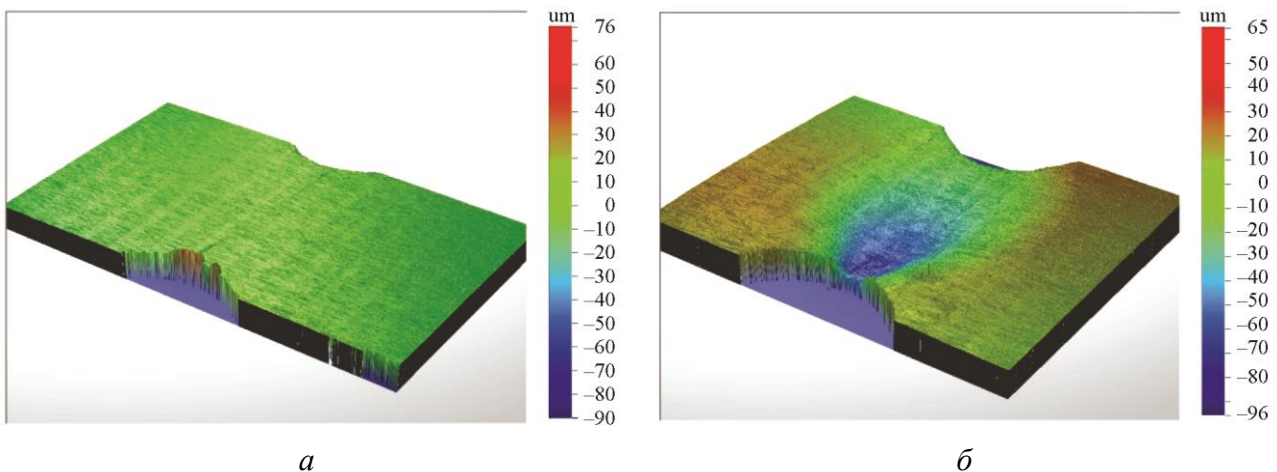


Рис. 10. 3D-профиль поверхности образца стали 09Г2С в области U-образных надрезов (сторона Б): *а* – до циклических испытаний; *б* – после циклических испытаний

Кроме усталостных испытаний, на таких же образцах из стали 09Г2С проводили пошаговое одноосное растяжение со снятием нагрузки после каждого шага нагружения и возрастанием нагрузки при следующем шаге с регистрацией магнитных характеристик (относительной максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{Гмакс}}$, коэрцитивной силы H_c , остаточной индукции B_r и показаний магнитного градиентометра, установленного на боковой поверхности рабочей части образца) в нагруженном состоянии и после снятия нагрузки. Таким образом, при каждом шаге испытаний проводилось поэтапное увеличение максимального напряжения от 0 до 580 МПа с шагом 63 МПа в упругой области и 42 МПа в области развитой пластической деформации. Измерения с помощью магнитного градиентометра проводили только в исходном состоянии и в области развитой пластической деформации. Полученные результаты магнитных измерений приведены на рис. 11. Видно, что зависимости $\mu_{\text{Гмакс}}$ и B_r от приложенных напряжений σ имеют характер, обратный зависимости $H_c(\sigma)$, что соответствует многочисленным литературным данным [26–31]. При $\sigma < \sigma_T$ при приложенной нагрузке в образце происходит формирование магнитной текстуры деформации. Как следствие, значения $\mu_{\text{Гмакс}}$ растут, а значения H_c уменьшаются, что обусловлено положительным магнитоупругим эффектом. В случае $\sigma < \sigma_T$ после снятия нагрузки магнитные характеристики образца практически не изменяются по сравнению с исходными (до растяжения) значениями.

Таким образом, при пошаговом упругом растяжении образца не происходит необратимых изменений его магнитных свойств.

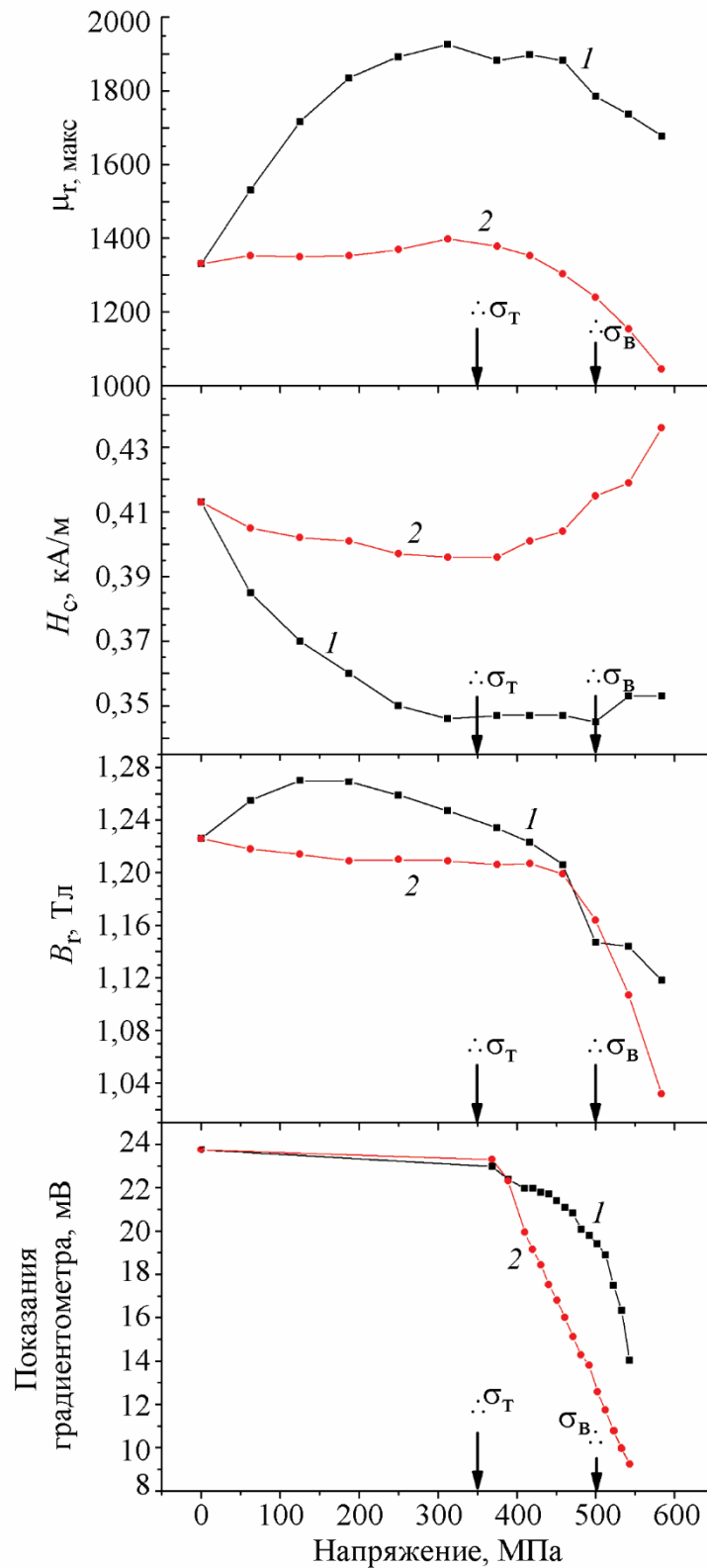


Рис. 11. Зависимости магнитных характеристик при пошаговом одноосном растяжении с возрастающей нагрузкой и снятии нагрузки до нуля после достижения максимального напряжения в цикле: 1 – при приложенной нагрузке; 2 – после снятия нагрузки

При переходе из области упругого деформирования в область развитой деформации происходит изменение хода кривых для всех измеренных магнитных характеристик. Стадия деформационного упрочнения характеризуется интенсивным повышением плотности дислокаций. Следует отметить, что в условиях приложенной нагрузки в интервале $\sigma_T < \sigma < \sigma_B$ магнитные характеристики изменяются слабо, что обусловлено взаимным уравновешиванием разнонаправленного влияния на них упругой и пластической деформации. После снятия нагрузки H_c увеличивается, а $\mu_{\text{гмакс}}$ уменьшается, что вызвано исчезновением магнитной текстуры. При дальнейшем увеличении приложенной нагрузки фактор увеличения плотности дефектов начинает превалировать, а это вызывает заметный рост H_c и снижение $\mu_{\text{гмакс}}$ и B_T .

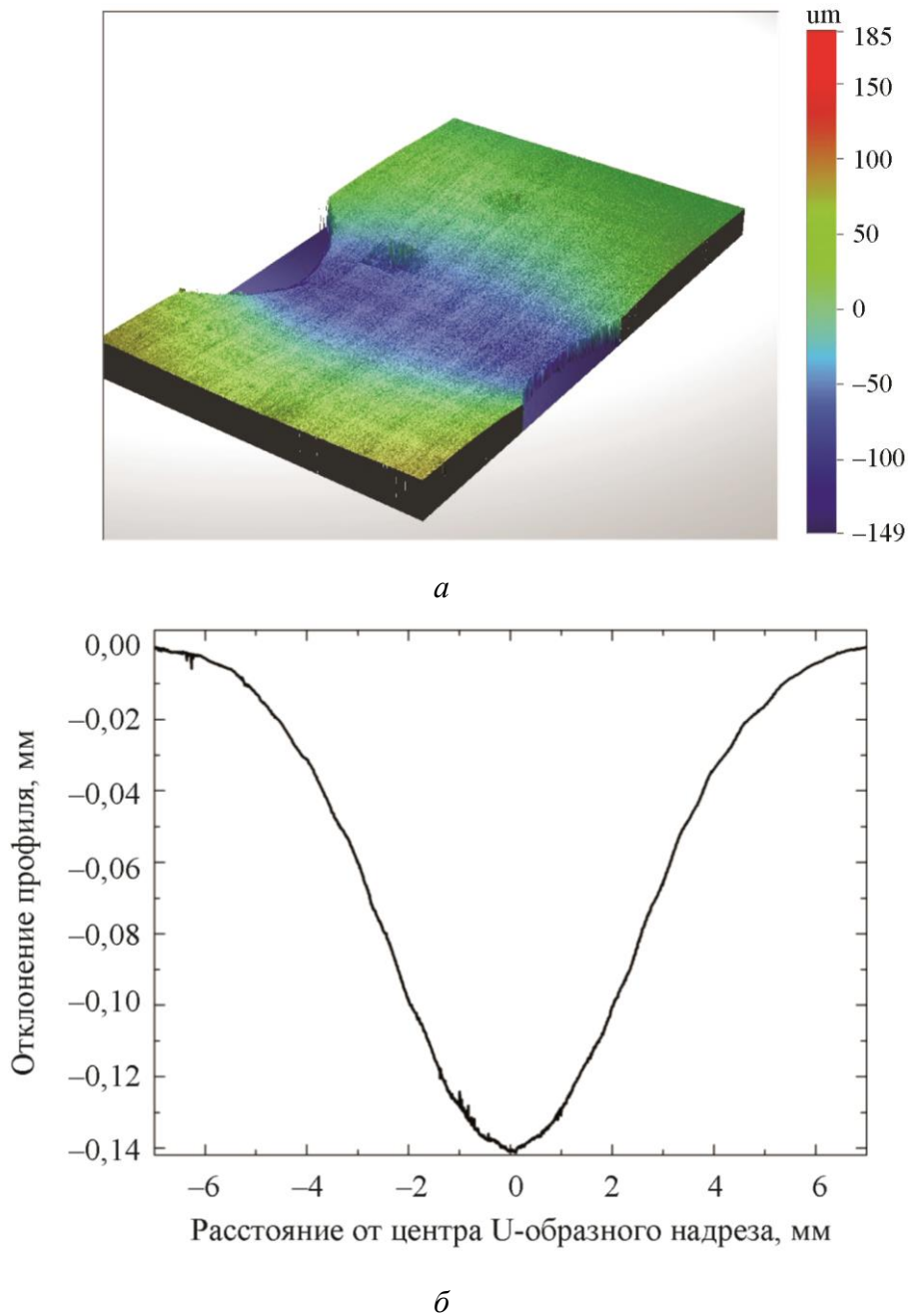


Рис. 12. Поверхность образца стали 09Г2С в области U-образных надрезов после растяжения:
a – 3D профиль; *b* – профиль поверхности

Показания градиентометра при максимальных напряжениях в цикле и после снятия нагрузки практически совпадают при напряжениях ниже предела текучести исследуемого материала. Это свидетельствует об отсутствии существенных необратимых изменений структуры и магнитного состояния материала при упругой деформации. Значительные отклонения в показаниях градиентометра наблюдаются при увеличении нагрузки выше предела текучести, причем, чем больше нагрузка, тем больше разница в этих показаниях. Однозначность зависимостей, показанных на рис. 11, свидетельствует о возможности использования данной методики для контроля накопленной деформации при нагружении объекта.

Результаты оптической профилометрии, выполненной с помощью бесконтактного профилометра Wyko NT 1100, для образца, подвергнутого растяжению до напряжения 580 МПа, приведены на рис. 12.

Толщина образца в месте надрезов после нагружения до 580 МПа уменьшилась на 0,28 мм, до 3,72 мм. Ширина образца, измеренная по середине надрезов, то есть в области минимального сечения, после нагружения до 580 МПа уменьшилась на 0,21 мм, до 5,79 мм. Таким образом, наименьшее сечение рабочей части образца после растяжения стало равно 21,54 мм² и уменьшилось почти на 11 %.

4. Заключение

Проведен комплексный анализ с целью обнаружения зон предразрушения при циклическом одноосном растяжении плоских разрывных образцов из отожженной стали 09Г2С с U-образными надрезами посередине рабочей части, позволяющими локализовать место зарождения усталостной трещины и ограничить область для проведения исследований. Выявлены закономерности изменения сигнала приставного феррозондового градиентометра с ростом числа циклов нагружения. В процессе пошагового одноосного растяжения при увеличении нагрузки выше предела текучести показания градиентометра снижаются. Это обусловлено увеличением дефектности структуры. Установлено, что значительные изменения показаний градиентометра на отдельных участках поверхности исследованных образцов обусловлены формированием очагов разрушения.

Исследовано изменение величины коэффициента корреляции спекловых изображений на разных стадиях циклических испытаний. Снижение частоты нагружения, характеризующее начальную стадию деформации, зафиксировано при 314 000 циклов нагружения, а неоднородность на картине спекловых изображений, связанная с началом формирования полос скольжения, – при 300 000 циклах. Показано, что возникновение неоднородности на картине спекловых изображений связано с зарождением очага разрушения.

Таким образом, в ходе проведенных исследований была обоснована возможность использования магнитных и спекл-интерферометрических методов для обнаружения зон предразрушения при циклическом нагружении объектов.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № АААА-А18-118020790148-1. При проведении исследований использовано оборудование ЦКП «Пластометрия».

Авторы выражают благодарность сотруднику лаборатории технической диагностики ИМАШ УрО РАН Владимирову А. П. за разработанную оригинальную методику динамического варианта оптической спекл-интерферометрии.

Литература

1. Закономерности стадии предразрушения в физической мезомеханике / В. Е. Панин, Л. С. Деревягина, Е. Е. Дерюгин, А. В. Панин, С. В. Панин, Н. А. Антипина // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6, № 6. – С. 97–106.
2. Panin V. E. Overview on mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 1998. – Vol. 30, No. 1. – P. 1–11. – DOI: 10.1016/S0167-8442(98)00038-X.
3. Gorkunov E. S. Magnetic Structural-Phase Analysis as Applied to Diagnosing and Evaluating the Lifetime of Products and Structural Components. Part 1 // Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2015. – Iss. 1. – P. 6–40. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.1.006-040. – URL: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_1_2015_Gorkunov_E._S..pdf
4. Magnetic nondestructive evaluation of fatigue damage of ferromagnetic steels for nuclear fusion energy systems / A. Gilanyi, K. Morishita, T. Sukegawa, M. Uesaka., K. Miya // Fusion Engineering and Design. – 1998. – Vol. 42, iss. 1–4. – С. 485–491. – DOI: 10.1016/S0920-3796(98)00180-X.
5. Плехов О. А., Пантелеев И. А., Леонтьев В. А. Особенности выделения тепла и генерации сигналов акустической эмиссии при циклическом деформировании армко-железа // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 5. – С. 37–43.
6. Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels / T. Boulanger, A. Chrysochoos, C. Mabru, A. Galtier // International Journal of Fatigue. – 2004. – Vol. 26, iss. 3. – P. 221–229. – DOI: 10.1016/S0142-1123(03)00171-3.
7. Palumbo D., Galietti U. Characterisation of steel welded joints by infrared thermographic methods // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2014. – Vol. 11 (1). – P. 29–42. – DOI: 10.1080/17686733.2013.874220.
8. Benaarbia A., Chrysochoos A., Robert G. // Photomechanics Conference, 25–27 May 2015, Delft, Netherlands : book of abstracts. – 2015. – P. 86–88.
9. Горкунов Э. С., Мушников А. Н. Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных сталях (обзор) // Контроль. Диагностика. – 2020. – Т. 23, № 12 (270). – С. 4–23. – DOI: 10.14489/td.2020.12.pp.004-023 .
10. Горкунов Э. С., Задворкин С. М., Дмитров Р. Применение магнитных методов для обнаружения зон локализации пластической деформации в конструкционных сталях // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 1. – С. 12–15. – DOI: 10.14489/td.2017.01.pp.012-015.
11. Characteristics of acoustic emission for A537 structural steel during fatigue crack propagation / Z. F. Wang, J. Li, W. Ke, Z. Zhu // Scripta Metallurgica et Materialia. – 1992. – Vol. 27 (5). – P. 641–646. – DOI: 10.1016/0956-716X(92)90354-H.
12. Разумовский И. А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела : учеб. пособие. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 240 с.
13. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / В. Э. Вильдеман, М. П. Третьяков, Т. В. Третьякова, Р. В. Бульбович, С. В. Словиков, А. В. Бабушкин, А. В. Ильиных, Д. С. Лобанов, А. В. Ипатова / под ред. В. Э. Вильдемана. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 204 с.
14. Gorkunov E. S. Magnetic Structural-phase Analysis. Part II // Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2015. – Iss. 3. – P. 6–50. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.006-050. – URL: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_3_2015_Gorkunov_E._S._006_050.pdf
15. An electromagnetic-acoustic method for studying stress-strain states of rails / V. V. Murav'ev, L. V. Volkova, A. V. Platonov, and V. A. Kulikov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – Vol. 52 (7). – P. 370–376. – DOI: 10.1134/S1061830916070044.
16. Lasar J., Hola M., and Cip O. Differential interferometry for real-time measurement in high cycle fatigue metal testing // Proceedings of the Conference PhotoMechanics, Delft University, Netherlands, 25–27 May 2015 : book of abstracts, pp. 64–65.

17. Influence of the two-stage plastic deformation on the complex of the magnetoacoustic characteristics of low-carbon steel and diagnostics of its structural state / Evgeny D. Serbin, Vladimir N. Kostin, Olga N. Vasilenko, Danila G. Ksenofontov, Evgeny G. Gerasimov, Pavel B. Terentev // *NDT & E International*. – 2020. – Vol. 116, article 102330. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102330.
18. Vladimirov A. P. Dynamic speckle interferometry of microscopic and macroscopic processes in deformable media // *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2015. – Iss. 6. – P. 27–57. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.6.027-057. – URL: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_6_2015_Vladimirov_A.P._027_057.pdf
19. Арутюнян А. Р., Зимин Б. А., Судьенков Ю. В. Исследование циклической долговечности конструкционных материалов методом оптико-акустической спектроскопии // *Вестник Санкт-Петербургского Университета. Математика. Механика. Астрономия*. – 2008. – № 3. – С. 88–96.
20. Иванов В. С. Разрушение металлов. – М. : Metallurgiya, 1979. – 168 с.
21. Ботвина Л. Р. Разрушение. Кинетика, механизмы, общие закономерности / ИМЕТ им. А. А. Байкова РАН. – М. : Наука, 2008. – 334 с.
22. Терентьев В. Ф., Петухов А. Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. – М. : ИМЕТ–ЦИАМ, 2013. – 514 с.
23. Vinogradov A. Yu., Hashimoto S. Fatigue of ultrafine-grained materials produced by equal-channel angular pressing // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2004. – No. 1. – P. 42–51.
24. Possibilities of magnetic inspection of plastic deformations preceding failures of low-carbon steels constructions / A. P. Nichipuruk, A. N. Stashkov, V. N. Kostin, M. K. Korkh // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2009. – Vol. 45 (9). – P. 616–622.
25. Терентьев В. Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов : монография. – М. : Интермет Инжиниринг, 2002. – 287 с.
26. Бида Г. В., Ничипурук А. П. Магнитные свойства термообработанных сталей. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 218 с.
27. Some features in the behavior of magnetic and acoustic characteristics of hot-rolled 08G2B steel under cyclic loading / E. S. Gorkunov, A. M. Povolotskaya, S. M. Zadvorkin, E. A. Putilova, A. N. Mushnikov, E. G. Bazulin, A. Kh. Vopilkin // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2019. – Vol. 55, No. 11. – P. 827–836. – DOI: 10.1134/S1061830919110044.
28. Magnetic Techniques for Estimating Elastic and Plastic Strains in Steels under Cyclic Loading / E. S. Gorkunov, R. A. Savrai, A. V. Makarov, S. M. Zadvorkin // *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2015. – Iss. 2. – P. 6–15. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.2.006-015. – URL: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_2_2015_Gorkunov_E.S._et_al_6_15.pdf
29. The Effect of Cyclic Preloading on the Magnetic Behavior of the Hot-Rolled 08G2B Steel Under Elastic Uniaxial Tension / E. S. Gorkunov, A. M. Povolotskaya, S. M. Zadvorkin, E. A. Putilova, A. N. Mushnikov // *Research in Nondestructive Evaluation*. – 2021. – Vol. 32, No. 6. – P. 276–294. – DOI: 10.1080/09349847.2021.2002487.
30. Effect of mechanical stresses on the magnetic characteristics of pipe steel / E. S. Gorkunov, S. M. Zadvorkin, A. N. Mushnikov, S. V. Smirnov, E. I. Yakushenko // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2014. – Vol. 55 (3). – P. 530–538. – DOI: 10.1134/S002189441403016X.
31. Влияние пластической деформации на структуру и магнитные свойства корпусной стали / А. Н. Мушников, Е. А. Путилова, А. М. Поволоцкая, Л. С. Горулева // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2022. – № 11 (809). – С. 3–10. – DOI: 10.30906/mitom.2022.11.3-10.



Revised: 30.12.2022
Accepted: 20.02.2023
Accepted: 28.02.2023
DOI: 10.17804/2410-9908.2023.1.041-053



EXACT SOLUTIONS TO THE NAVIER–STOKES EQUATIONS FOR DESCRIBING INHOMOGENEOUS ISOBARIC VERTICAL VORTEX FLUID FLOWS IN REGIONS WITH PERMEABLE BOUNDARIES

L. S. Goruleva^{1, 2, a)} and E. Yu. Prosviryakov^{1, 2, b), *}

¹*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

²*Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia*

a)  <https://orcid.org/0000-0001-8635-5213>  sherlarisa@yandex.ru;

b)  <https://orcid.org/0000-0002-2349-7801>  evgen_pros@mail.ru

*Corresponding author. E-mail: evgen_pros@mail.ru

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia
Tel.: +7 (343) 375 3576; fax: +7 (343) 374 5330

A family of exact solutions to the Navier–Stokes equations is constructed to describe nonuniform two-dimensional fluid motions. The superposition of the main unidirectional flow with the secondary flow is considered. The secondary flow is determined by suction or injection through permeable boundaries. This class of exact solutions is obtained by multiplicative and additive separation of variables. The flow of a viscous incompressible fluid is described by a polynomial of the horizontal (longitudinal) coordinate. The polynomial coefficients are functions of the vertical (transverse) coordinate and time. They are determined by a chain of homogeneous and inhomogeneous parabolic partial differential equations with a convective term. In the case of a steady flow, it is described by a system of ordinary differential equations with constant coefficients. An algorithm for integrating a system of ordinary differential equations for studying the steady motion of a viscous fluid is presented. In this case, all the functions defining the velocity are quasipolynomials since the system of ordinary differential equations has an Euler-form exact solution.

Keywords: exact solution, Navier–Stokes equation, suction, injection, permeable boundaries, nonuniform flow.

Acknowledgment

The work was performed under the state assignment, theme No. AAAA-A18-118020790140-5.

References

1. Aristov S.N., Knyazev D.V., Polyanin A.D. Exact solutions of the Navier–Stokes equations with the linear dependence of velocity components on two space variables. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2009, vol. 43, No. 5, pp. 642–662. DOI: 10.1134/S0040579509050066.
2. Drazin P.G., Riley N. *The Navier–Stokes Equations: A classification of Flows and Exact Solutions*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2006, 196 p.
3. Pukhnachev V.V. Symmetries in the Navier–Stokes equations. *Uspekhi Mekhaniki*, 2006, No. 1, pp. 6–76. (In Russian).
4. Ershkov S.V., Prosviryakov E.Yu, Burmasheva N.V, Christianto V. Towards understanding the algorithms for solving the Navier–Stokes equations. *Fluid Dynamics Research*, 2021, vol. 53, No. 4, 044501. DOI: 10.1088/1873-7005/ac10f0.

5. Wang C.Y. Exact solutions of the unsteady Navier–Stokes equations. *Appl. Mech. Rev.*, 1989, vol. 42 (11S), pp. 269–282. DOI: 10.1115/1.3152400.
6. Wang C.Y. Exact solutions of the steady-state Navier–Stokes equations. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1991, vol. 23, pp. 159–177. DOI: 10.1146/annurev.fl.23.010191.001111.
7. Burmasheva N.V., Prosviryakov E.Yu. Exact solutions of the Navier–Stokes equations for describing an isobaric one-directional vertical vortex flow of a fluid. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2021, iss. 2, pp. 30–51. DOI: 10.17804/2410-9908.2021.2.030-051. Available at: DREAM_Issue_2_2021_Burmasheva_N.V._et_al._030_051.pdf
8. Burmasheva N.V., Prosviryakov E.Yu. Exact solutions to Navier–Stokes equations describing a gradient nonuniform unidirectional vertical vortex fluid flow. *Dynamics*, 2022, vol. 2, pp. 175–186. DOI: 10.3390/dynamics2020009.
9. Couette M. Etudes sur le frottement des liquids. *Ann. Chim. Phys.*, 1890, vol. 21, pp. 433–510.
10. Stokes G.G. On the effect of the internal friction of fluid on the motion of pendulums. *Camb. Philo. Trans.*, 1851, vol. 9, pp. 8–106.
11. Aristov S.N., Gitman I.M. Viscous flow between two moving parallel disks. Exact solutions and stability analysis. *J. Fluid Mech.*, 2002, vol. 464, pp. 209–215. DOI: 10.1017/S0022112002001003.
12. Goruleva L.S., Prosviryakov E.Yu. Unidirectional steady-state inhomogeneous Couette flow with a quadratic velocity profile along a horizontal coordinate. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2022, iss. 3, pp. 47–60. DOI: 10.17804/2410-9908.2022.3.047-060. Available at: DREAM_Issue_3_2022_Goruleva_L.S._et_al._047_060.pdf
13. Bogoyavlenskij O. The new effect of oscillations of the total angular momentum vector of viscous fluid. *Physics of Fluids*, 2022, vol. 34, 083108. DOI: 10.1063/5.0101870.
14. Bogoyavlenskij O. The new effect of oscillations of the total kinematic momentum vector of viscous fluid. *Physics of Fluids*, 2022, vol. 34, 123104. DOI: 10.1063/5.0127990.
15. Aristov S.N., Prosviryakov E.Yu. A new class of exact solutions for three-dimensional thermal diffusion equations. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2016, vol. 50, No. 3, pp. 286–293. DOI: 10.1134/S0040579516030027.
16. Burmasheva N.V., Prosviryakov E.Yu. Exact solution of Navier-Stokes equations describing spatially inhomogeneous flows of a rotating fluid. *Trudy IMM UrO RAN*, 2020, vol. 26, No. 2, pp. 79–87. DOI: 10.21538/0134-4889-2020-26-2-79-87. (In Russian).
17. Burmasheva N.V., Prosviryakov E.Yu. A class of exact solutions for two-dimensional equations of geophysical hydrodynamics with two Coriolis parameters. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Mathematics*, 2020, vol. 32, pp. 33–48. DOI: 10.26516/1997-7670.2020.32.33. (In Russian).
18. Prosviryakov E.Yu. New class of exact solutions of Navier–Stokes equations with exponential dependence of velocity on two spatial coordinates. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2019, vol. 53, No. 1, pp. 107–114. DOI: 10.1134/S0040579518060088.
19. Aristov S.N., Prosviryakov E.Yu. Large-scale flows of viscous incompressible vortical fluid. *Russian Aeronautics*, 2015, vol. 58, No. 4, pp. 413–418. DOI: 10.3103/S1068799815040091.
20. Aristov S.N., Prosviryakov E.Yu. Inhomogeneous Couette flow. *Nelineynaya Dinamika*, 2014, vol. 10, No. 2, pp. 177–182. DOI: 10.20537/nd1402004. (In Russian).
21. Aristov S.N., Prosviryakov E.Yu. Unsteady layered vortical fluid flows. *Fluid Dynamics*, 2016, vol. 51, No. 2, pp. 148–154. DOI: 10.1134/S0015462816020034.
22. Zubarev N.M., Prosviryakov E.Yu. Exact solutions for layered three-dimensional nonstationary isobaric flows of a viscous incompressible fluid. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, vol. 60, No. 6, pp. 1031–1037. DOI: 10.1134/S0021894419060075.

23. Goruleva L.S., Prosviryakov E.Yu. Nonuniform Couette–Poiseuille shear flow with a moving lower boundary of a horizontal layer. *Technical Physics Letters*, 2023. DOI: 10.1134/S1063785022090024.
24. Prosviryakov E.Yu. Layered gradient stationary flow vertically swirling viscous incompressible fluid. *CEUR Workshop Proceedings*, 2016, vol. 1825, pp. 164–172. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol1825/p21.pdf>
25. Privalova V.V., Prosviryakov E.Yu., Simonov M.A. Nonlinear gradient flow of a vertical vortex fluid in a thin layer. *Rus. J. Nonlin. Dyn.*, 2019, vol. 15 (3), pp. 271–283. DOI: 10.20537/nd190306.
26. Privalova V.V., Prosviryakov E.Yu. Nonlinear isobaric flow of a viscous incompressible fluid in a thin layer with permeable boundaries. *Computational Continuum Mechanics*, 2019, vol. 12, No. 2, pp. 230–242. DOI: 10.7242/1999-6691/2019.12.2.20. (In Russian).
27. Aristov S.N., Shvarts K.G. *Vikhrevye techeniya advektivnoy prirody vo vrashchayushchemsya sloe zhidkosti* [Vortical Flows of the Advective Nature in a Rotating Fluid Layer]. Perm, Perm. Un-ty Publ., 2006, 155 p. (In Russian).
28. Berman A.S. Laminar flow in channels with porous walls. *J. Appl. Phys.*, 1953, vol. 24, No. 9, pp. 1232–1235. DOI: 10.1063/1.1721476.
29. Yuan S.W. Further investigation of laminar flow in channels with porous walls. *J. Appl. Phys.*, 1956, vol. 27, iss. 3, pp. 267. DOI: 10.1063/1.1722355.
30. Yuan S.W., Finkelstein A.B. Laminar pipe flow with injection and suction through a porous wall. *Trans. ASME*, 1956, vol. 78, No. 4, pp. 719–724.
31. Sellars J.R. Laminar flow in channels with porous walls at high suction Reynolds numbers. *J. Appl. Phys.*, 1955, vol. 26, No. 4, pp. 489–490. DOI: 10.1063/1.1722024.
32. Berman A.S. Concerning laminar flow in channels with porous walls. *J. Appl. Phys.*, 1956, vol. 27, No. 12, pp. 1557. DOI: 10.1063/1.1722307.
33. Regirer S.A. Approximate theory of the flow of a viscous incompressible liquid in pipes with porous walls. *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Matematika*, 1962, No. 5, pp. 65–74.
34. Polyanin A.D., Zhurov A.I. *Metody razdeleniya peremennykh i tochnye resheniya nelineynykh uravneniy matematicheskoy fiziki* [Methods of Separation of Variables and Exact Solutions of Nonlinear Equations of Mathematical Physics]. Moscow, IPMekh RAN Publ., 2020, 384 p. (In Russian).
35. Polyanin A.D. Exact generalized separable solutions of the Navier–Stokes equations. *Doklady Akademii Nauk*, 2001, vol. 380, No. 4, pp. 491–496. (In Russian).
36. Polyanin A.D. Methods of functional separation of variables and their application in mathematical physics. *Matematicheskoe Modelirovanie i Chislennye Metody*, 2019, No. 1, pp. 65–97. DOI: 10.18698/2309-3684-2019-1-6597. (In Russian).
37. Polyanin A.D., Zhurov A.I. Functional separable solutions of two classes of nonlinear mathematical physics equations. *Doklady Akademii Nauk*, 2019, vol. 486, No. 3, pp. 287–291. DOI: 10.31857/S0869-56524863287-291. (In Russian).
38. Polyanin A.D., Zaitsev V.F. *Handbook of Nonlinear Partial Differential Equations*, Boca Raton, London, New York, Chapman & Hall/CRC Press, 2004, 840 p. DOI: 10.1201/9780203489659.

Подана в журнал: 30.12.2022

УДК 517.958



DOI: 10.17804/2410-9908.2023.1.041-053



ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ–СТОКСА ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ИЗОБАРИЧЕСКИХ ВЕРТИКАЛЬНО ЗАВИХРЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В ОБЛАСТЯХ С ПРОНИЦАЕМЫМИ ГРАНИЦАМИ

Л. С. Горюлева^{1, 2, а)}, Е. Ю. Просвирыков^{1, 2, б), *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,
ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

а)  <https://orcid.org/0000-0001-8635-5213>  sherlarisa@yandex.ru

б)  <https://orcid.org/0000-0002-2349-7801>  evgen_pros@mail.ru

* Ответственный автор. Электронная почта: evgen_pros@mail.ru
Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, Россия
Тел.: +7 (343) 375-35-76; факс: +7 (343) 374-53-30

В статье построено семейство точных решений уравнений Навье–Стокса для описания неоднородных двумерных движений жидкости. Рассматривается суперпозиция основного однонаправленного потока с вторичным течением. Вторичное течение определяется отсосом или вдувом через проницаемые границы. Данный класс точных решений получен методом разделения переменных мультипликативным и аддитивным способом. Течение вязкой несжимаемой жидкости описывается полиномом от горизонтальной (продольной) координаты. Коэффициенты полинома являются функциями от вертикальной (поперечной) координаты и времени. Они определяются цепочкой однородных и неоднородных уравнений в частных производных параболического типа с конвективным слагаемым. В случае установившегося течения оно описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Приведен алгоритм интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений для изучения установившегося движения вязкой жидкости. В этом случае все функции, определяющие скорость, являются квазиполиномами из-за того, что система обыкновенных дифференциальных уравнений имеет точное решение в форме Эйлера.

Ключевые слова: точное решение, уравнение Навье–Стокса, отсос, вдув, проницаемые границы, неоднородное течение.

1. Введение

Однонаправленные течения вязкой несжимаемой жидкости – это движения среды с диссипацией, описываемые посредством одной компоненты трехмерного вектора скорости $V = (V_x, 0, 0)$ [1–8]. Одномерные по скорости течения жидкости стали предметом изучения математиков, механиков и физиков, поскольку в этом случае система, состоящая из уравнений Навье–Стокса и уравнения неразрывности (несжимаемости), сводится к следующему двумерному уравнению типа теплопроводности размерности $(2+1)$ [7, 8]:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} = \nu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right).$$

Традиционно исследуется не уравнение, записанное выше, а его частный случай – одномерное уравнение [1, 2, 4]

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2}.$$

При помощи данного уравнения изучают неустановившиеся движения жидкости Куэтта, Стокса и другие течения, индуцированные различными типами начально-краевых условий [1, 2, 4]. Точные решения Куэтта, первой и второй задач Стокса описывают слоистые (сдвиговые) течения, профиль скорости которых зависит только от одной координаты z (вертикальной или поперечной). Тогда, как видно выше, можно уже для однонаправленных потоков исследовать влияние пространственной неоднородности на структуру гидродинамического потока [1, 2, 4].

Точные решения для неоднородных изобарических однонаправленных течений вязкой несжимаемой жидкости были построены в статье [7]. В научной работе [8] были получены точные решения типа Пуазейля и Куэтта–Пуазейля для неоднородных однонаправленных течений. Точные решения, анонсированные в [7, 8], оказались полезными для построения новых классов точных решений уравнений Навье–Стокса, поскольку позволили обнаружить качественные эффекты, наблюдаемые ранее в двумерных или трехмерных течениях [12–16]. Отметим, что топология однонаправленного поля скоростей для одномерного неоднородного течения типа Куэтта позволила описать стратификацию с несколькими точками покоя [12]. Для сдвиговых неоднородных течений аналогичные результаты были получены недавно [17–28]. Таким образом, необходимо продолжать находить новые точные решения уравнений Навье–Стокса для их использования в теории и практике, а также в построении новой теории гидродинамической устойчивости.

В данной статье рассматривается построение класса точных решений для изобарических неоднородных течений с отсосом и вдувом жидкости через проницаемые границы. Полагается, что вертикальная скорость жидкости постоянна. Это допущение физически обосновано для многих технических и физических процессов с учетом проницаемости границ области течения [28, 29]. Впервые задача о влиянии вторичного поперечного течения на структуру фонового потока начала изучаться в [30], а продолжение исследований можно проследить по пионерским работам [31–35]. К настоящему времени появилась возможность аналитического исследования течений жидкости с проницаемыми границами, что важно для решения задач гидродинамики от наноуровня до крупномасштабных течений океанов и струй в астрофизических движениях плазмы и различных газов.

2. Постановка задачи

Движение вязкой несжимаемой жидкости при постоянном давлении в бесконечном горизонтальном слое описывается векторным уравнением Навье–Стокса и скалярным уравнением неразрывности (несжимаемости) [7, 8]:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V}, \nabla) \mathbf{V} = \nu \Delta \mathbf{V}, \quad (1)$$

$$(\nabla, \mathbf{V}) = 0. \quad (2)$$

В уравнении переноса момента импульса (1) и уравнении неразрывности (несжимаемости) (2) введены стандартные обозначения: $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)$ – вектор скорости; ν – кинематическая (молекулярная) вязкость жидкости; $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ – трехмерный оператор Гамильтона; $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$ – трехмерный оператор Лапласа; круглые скобки в уравнении (1) определяют скалярное произведение.

Далее будем рассматривать двумерные течения жидкости с полем скоростей, которое задается вектором

$$\mathbf{V} = (V_x(x, y, z, t), 0, w). \quad (3)$$

Здесь w – вертикальная (поперечная) скорость жидкости в бесконечном горизонтальном слое жидкости, которая является постоянной. Соответственно, скорость $V_x(x, y, z, t)$ называется горизонтальной (продольной).

После подстановки вектора скорости (3) в уравнения (1) и (2) получим следующую систему [7, 8]:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + w \frac{\partial V_x}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} = 0. \quad (5)$$

Система уравнений (4) и (5), в силу уравнения несжимаемости (5), редуцируется к одному уравнению типа теплопроводности с конвективным перемешиванием:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + w \frac{\partial V_x}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

с полем скоростей, зависящим от двух координат и времени,

$$\mathbf{V} = (V_x(y, z, t), 0, 0). \quad (7)$$

3. Некоторые частные решения

Точное решение уравнения (6) будет далее найдено при помощи модификаций метода разделенных переменных [34–38]. Отметим, что решением уравнения (7) является частный случай (7), описывающий сдвиговое (слоистое) течение типа Куэтта:

$$V_x = U(z, t). \quad (8)$$

В этом случае неизвестная функция U вычисляется посредством интегрирования уравнения типа теплопроводности:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + w \frac{\partial U}{\partial z} = \nu \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}.$$

Данное уравнение имеет фундаментальное решение [34, 38]:

$$U = \frac{1}{2\sqrt{\pi\nu t}} \exp\left(-\frac{(z-wt)^2}{4\nu t}\right).$$

В зависимости от рода краевых условий на границах $z=0$ и $z=h$ (h – толщина слоя), можно записать точное решение посредством функции Грина [29, 33].

Если рассматривается установившееся течение $V_x = U(z)$ вязкой несжимаемой жидкости, то точное решение определяется из обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка:

$$\nu \frac{d^2 U}{dz^2} - w \frac{dU}{dz} = 0.$$

Это обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка, которое имеет два линейно независимых решений Эйлера:

$$U = C_1 + C_2 \exp\left(\frac{w}{\nu} z\right).$$

Здесь C_1 и C_2 – постоянные интегрирования.

Аналогично поле скоростей

$$V_x = y u_1(z, t) \tag{9}$$

является точным решением уравнения (6). В силу линейности (6) сумма полей скоростей (8) и (9)

$$V_x = U(z, t) + y u_1(z, t) \tag{10}$$

есть точное решение для уравнения (6). Поставив суперпозицию решений (8) и (9) в формулу (6), получим уравнение

$$\frac{\partial U}{\partial t} + y \frac{\partial u_1}{\partial t} + w \left(\frac{\partial U}{\partial z} + y \frac{\partial u_1}{\partial z} \right) = \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + y \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} \right).$$

Скорость U и пространственное ускорение u_1 определяются после интегрирования системы изолированных уравнений

$$\frac{\partial U}{\partial t} + w \frac{\partial U}{\partial z} = \nu \frac{\partial^2 U}{\partial z^2};$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + w \frac{\partial u_1}{\partial z} = v \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2}.$$

Данная система легко интегрируется аналогично тому, как было получено точное решение для поля скоростей (8).

В статьях [7, 8] было показано, что при $w = 0$ функция вида $\frac{y^2}{2} u_2(z, t)$ не является точным решением (6).

Рассмотрим теперь сумму решения (10) и нелинейного слагаемого вида $\frac{y^2}{2} u_2(z, t)$:

$$V_x = U(z, t) + y u_1(z, t) + \frac{y^2}{2} u_2(z, t). \quad (11)$$

Этот многочлен удовлетворяет этому уравнению. Неизвестные функции в представлении поля скоростей вычисляются из системы уравнений в частных производных типа теплопроводности с конвективным перемешиванием:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + w \frac{\partial U}{\partial z} &= v \left(u_2 + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial u_1}{\partial t} + w \frac{\partial u_1}{\partial z} &= v \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} + w \frac{\partial u_2}{\partial z} &= v \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Система (12) состоит из уравнений, которые слабо связаны между собой, что существенно облегчает аналитическое или численное интегрирование.

4. Класс полиномиальных решений

Рассмотрим далее точное решение уравнения (6) в виде многочлена специального вида относительно координаты y [7, 8]:

$$V_x = U(z, t) + \sum_{k=1}^n \frac{y^k}{k!} u_k(z, t). \quad (13)$$

В формуле (13) для краткости записи введен факториал

$$k! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (k-1) \cdot k = \prod_{i=1}^k i.$$

Посчитаем отдельно частные производные, необходимые для подстановки в уравнение типа теплопроводности (7):

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial t} + \sum_{k=1}^n \frac{y^k}{k!} \frac{\partial u_k}{\partial t};$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial V_x}{\partial z} &= \frac{\partial U}{\partial z} + \sum_{k=1}^n \frac{y^k}{k!} \frac{\partial u_k}{\partial z}; \\ \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \sum_{k=1}^n \frac{y^k}{k!} \frac{\partial^2 u_k}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} &= \sum_{k=2}^n \frac{y^{k-2}}{(k-2)!} u_k.\end{aligned}$$

Подставим получившиеся выражения в уравнение (7):

$$\begin{aligned}& \frac{\partial U}{\partial t} + \sum_{k=1}^n \frac{y^k}{k!} \frac{\partial u_k}{\partial t} + w \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \sum_{k=1}^n \frac{y^k}{k!} \frac{\partial u_k}{\partial z} \right) = \\ &= v \left[\sum_{k=2}^n \frac{y^{k-2}}{(k-2)!} u_k + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \sum_{k=1}^n \frac{y^k}{k!} \frac{\partial^2 u_k}{\partial z^2} \right]; \\ & \frac{\partial U}{\partial t} + w \frac{\partial U}{\partial z} + \sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{k!} \frac{\partial u_k}{\partial t} + w \frac{1}{k!} \frac{\partial u_k}{\partial z} \right) y^k = \\ &= v \left[\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{k!} \frac{\partial^2 u_k}{\partial z^2} y^k + \sum_{k=2}^n \frac{u_k}{(k-2)!} y^{k-2} \right].\end{aligned}$$

Если применить метод неопределенных коэффициентов, то данное уравнение можно переписать в виде системы дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}\frac{\partial U}{\partial t} + w \frac{\partial U}{\partial z} &= v \left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + u_2 \right); \\ \frac{\partial u_1}{\partial t} + w \frac{\partial u_1}{\partial z} &= v \left(u_3 + \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} + w \frac{\partial u_2}{\partial z} &= v \left(u_4 + \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} \right); \\ &\dots; \\ \frac{\partial u_{n-2}}{\partial t} + w \frac{\partial u_{n-2}}{\partial z} &= v \left(u_n + \frac{\partial^2 u_{n-2}}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial u_{n-1}}{\partial t} + w \frac{\partial u_{n-1}}{\partial z} &= v \frac{\partial^2 u_{n-1}}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial u_n}{\partial t} + w \frac{\partial u_n}{\partial z} &= v \frac{\partial^2 u_n}{\partial z^2} \dots\end{aligned} \tag{14}$$

Систему уравнений (14) целесообразно решать «снизу вверх» в силу ее линейной рекуррентной структуры. Отметим, что если в семействе точных решений (13) положить $n = 2$, т. е. ограничиться только квадратичными членами, то система (14) примет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + w \frac{\partial U}{\partial z} &= v \left(u_2 + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial u_1}{\partial t} + w \frac{\partial u_1}{\partial z} &= v \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} + w \frac{\partial u_2}{\partial z} &= v \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Получившаяся система полностью совпадает с приведенной выше системой (12), определяющей компоненты решения (11).

Проиллюстрируем рекуррентный способ интегрирования для описания установившихся течений для поля скоростей (11), которое имеет вид

$$V_x = U(z) + y u_1(z) + \frac{y^2}{2} u_2(z).$$

В этом случае система уравнений в частных производных типа теплопроводности (12) редуцируется к системе обыкновенных дифференциальных уравнений шестого порядка

$$\begin{aligned} v \frac{d^2 u_2}{dz^2} &= w \frac{du_2}{dz}; \\ v \frac{d^2 u_1}{dz^2} &= w \frac{du_1}{dz}; \\ v \left(u_2 + \frac{d^2 U}{dz^2} \right) &= w \frac{dU}{dz}. \end{aligned}$$

Точное решение последней системы имеет вид

$$\begin{aligned} u_2 &= C_2 \exp\left(\frac{w}{v} z\right) + C_1; \\ U &= \frac{v}{w} \left(C_2 z \exp\left(\frac{w}{v} z\right) - C_1 z \right) + C_3 \exp\left(\frac{w}{v} z\right) + C_4; \\ u_1 &= C_5 \exp\left(\frac{w}{v} z\right) + C_6. \end{aligned}$$

По аналогии с результатами, изложенными в [7, 8], можно выписать формулы для касательных напряжений и вектора завихренности неоднородного вертикально завихренного течения вязкой несжимаемой жидкости с вдувом или отсосом через проницаемые границы, которые естественным образом модифицируются. Ввиду тривиальности выкладок, они здесь не приводятся.

5. Заключение

В статье предложен новый класс точных решений уравнений Навье–Стокса для описания нестационарного изобарического течения жидкости с учетом постоянной вертикальной (поперечной) скорости. Семейство точных решений является обобщенным (специальным) полиномом произвольного порядка от горизонтальной (продольной) координаты с коэффициентами, зависящими как от вертикальной координаты, так и от времени. Неизвестные функции определяются из решения системы уравнений параболического типа с конвективным слагаемым.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № АААА-А18-118020790140-5.

Литература

1. Aristov S. N., Knyazev D. V., Polyagin A. D. Exact solutions of the Navier–Stokes equations with the linear dependence of velocity components on two space variables // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2009. – Vol. 43, No. 5. – P. 642–662. DOI: 10.1134/S0040579509050066.
2. Drazin P. G., Riley N. *The Navier–Stokes Equations: A classification of flows and exact solutions*. – Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2006. – 196 p.
3. Пухначев В. В. Симметрии в уравнениях Навье–Стокса // *Успехи механики*. – 2006. – № 1. – С. 6–76.
4. Towards understanding the algorithms for solving the Navier-Stokes equations / S. V. Ershkov, E. Yu. Prosviryakov, N. V. Burmasheva, V. Christianto // *Fluid Dynamics Research*. – 2021. – Vol. 53, No. 4. – 044501. – DOI: 10.1088/1873-7005/ac10f0.
5. Wang C. Y. Exact solutions of the unsteady Navier–Stokes equations // *Appl. Mech. Rev.* – 1989. – Vol. 42 (11S). – P. 269–282. – DOI: 10.1115/1.3152400.
6. Wang C. Y. Exact solutions of the steady-state Navier–Stokes equations // *Annu. Rev. Fluid Mech.* – 1991. – Vol. 23. – P. 159–177. – DOI: 10.1146/annurev.fl.23.010191.001111.
7. Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Yu. Exact Solutions of the Navier–Stokes equations for describing an isobaric one-directional vertical vortex flow of a fluid // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2021. – Iss. 2. – P. 30–51. – DOI: 10.17804/2410-9908.2021.2.030-051. URL: DREAM_Issue_2_2021_Burmasheva_N.V._et_al._030_051.pdf
8. Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Yu. Exact solutions to Navier–Stokes equations describing a gradient nonuniform unidirectional vertical vortex fluid flow // *Dynamics*. – 2022. – Vol. 2. – P. 175–186. – DOI: 10.3390/dynamics2020009.
9. Couette M. Etudes sur le frottement des liquids // *Ann. Chim. Phys.* – 1890. – Vol. 21. – P. 433–510.
10. Stokes G. G. On the effect of the internal friction of fluid on the motion of pendulums // *Camb. Philo. Trans.* – 1851. – Vol. 9. – P. 8–106.
11. Aristov S. N., Gitman I. M. Viscous flow between two moving parallel disks. Exact solutions and stability analysis // *J. Fluid Mech.* – 2002. – Vol. 464. – P. 209–215. – DOI: 10.1017/S0022112002001003.
12. Goruleva L. S., Prosviryakov E. Yu. Unidirectional steady-state inhomogeneous Couette flow with a quadratic velocity profile along a horizontal coordinate // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2022. – Iss. 3. – P. 47–60. – DOI: 10.17804/2410-9908.2022.3.047-060. – URL: DREAM_Issue_3_2022_Goruleva_L.S._et_al._047_060.pdf
13. Bogoyavlenskij O. The new effect of oscillations of the total angular momentum vector of viscous fluid // *Physics Fluids*. – 2022. – Vol. 34. – 083108. – DOI: 10.1063/5.0101870.

14. Bogoyavlenskij O. The new effect of oscillations of the total kinematic momentum vector of viscous fluid // *Physics of Fluids*. – 2022. – Vol. 34. – 123104 – DOI: 10.1063/5.0127990.
15. Aristov S. N., Prosviryakov E. Y. A new class of exact solutions for three-dimensional thermal diffusion equations // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 50, No. 3. – P. 286–293. – DOI: 10.1134/S0040579516030027.
16. Бурмашева Н. В., Просвирыков Е. Ю. Точное решение уравнений Навье–Стокса, описывающее пространственно неоднородные течения вращающейся жидкости // *Труды Института математики и механики УрО РАН*. – 2020. – Т. 26, вып. 2. – С. 79–87. – DOI: 10.21538/0134-4889-2020-26-2-79-87.
17. Бурмашева Н. В., Просвирыков Е. Ю. Класс точных решений для двумерных уравнений геофизической гидродинамики с двумя параметрами Кориолиса // *Известия Иркутского государственного университета. Серия Математика*. – 2020. – Т. 32. – С. 33–48. – DOI: 10.26516/1997-7670.2020.32.33.
18. Prosviryakov E. Yu. New class of exact solutions of Navier–Stokes equations with exponential dependence of velocity on two spatial coordinates // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2019. – Vol. 53, No. 1. – P. 107–114. – DOI: 10.1134/S0040579518060088.
19. Аристов С. Н., Просвирыков Е. Ю. Крупномасштабные течения завихренной вязкой несжимаемой жидкости // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. – 2015. – Вып. 4. – С. 50–54.
20. Аристов С. Н., Просвирыков Е. Ю. Неоднородные течения Куэтта // *Нелинейная динамика*. – 2014. – Т. 10, вып. 2. – С. 177–182. – DOI: 10.20537/nd1402004.
21. Aristov S. N., Prosviryakov E. Yu. Unsteady layered vortical fluid flows // *Fluid Dynamics*. – 2016. – Vol. 51, No. 2. – P. 148–154. – DOI: 10.1134/S0015462816020034.
22. Zubarev N. M., Prosviryakov E. Yu. Exact solutions for layered three-dimensional nonstationary isobaric flows of a viscous incompressible fluid // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2019. – Vol. 60, No. 6. – P. 1031–1037. – DOI: 10.1134/S0021894419060075.
23. Goruleva L. S., Prosviryakov E. Yu. Nonuniform Couette–Poiseuille shear flow with a moving lower boundary of a horizontal layer // *Technical Physics Letters*. – 2023. – DOI: 10.1134/S1063785022090024.
24. Просвирыков Е. Ю. Слоистые градиентные стационарные течения вертикально завихренной вязкой несжимаемой жидкости // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2016. – Vol. 1825. – P. 164–172. – URL: <http://ceur-ws.org/Vol1825/p21.pdf>
25. Privalova V. V., Prosviryakov E. Yu., Simonov M. A. Nonlinear gradient flow of a vertical vortex fluid in a thin layer // *Rus. J. Nonlin. Dyn.* – 2019. – Vol. 15 (3). – P. 271–283. – DOI: 10.20537/nd190306.
26. Привалова В. В., Просвирыков Е. Ю. Нелинейное изобарическое течение вязкой несжимаемой жидкости в тонком слое с проницаемыми границами // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2019. – Т. 12, № 2. – С. 230–242. – DOI: 10.7242/1999-6691/2019.12.2.20.
27. Аристов С. Н., Шварц К. Г. Вихревые течения адвективной природы во вращающемся слое жидкости. – Пермь : Изд-во Пермск. гос. ун-та, 2006.
28. Berman A. S. Laminar flow in channels with porous walls // *J. Appl. Phys.* – 1953. – Vol. 24, No. 9. – P. 1232–1235. – DOI: 10.1063/1.1721476.
29. Yuan S. W. Further investigation of laminar flow in channels with porous walls // *J. Appl. Phys.* – 1956. – Vol. 27, iss. 3. – P. 267. – DOI: 10.1063/1.1722355 .
30. Yuan S. W., Finkelstein A. B. Laminar pipe flow with injection and suction through a porous wall // *Trans. ASME*. – 1956. – Vol. 78, No. 4. – P. 719–724.
31. Sellars J. R. Laminar flow in channels with porous walls at high suction Reynolds numbers // *J. Appl. Phys.* – 1955. – Vol. 26, No. 4. – P. 489–490. – DOI: 10.1063/1.1722024.
32. Berman A. S. Concerning laminar flow in channels with porous walls // *J. Appl. Phys.* – 1956. – Vol. 27, No. 12. – P. 1557. – DOI: 10.1063/1.1722307.

33. Регирер С. А. О приближенной теории течения вязкой несжимаемой жидкости в трубах с пористыми стенками // Изв. вузов. Матем. – 1962. – № 5. – С. 65–74.
34. Полянин А. Д., Журов А. И. Методы разделения переменных и точные решения нелинейных уравнений математической физики. – М. : Изд-во ИПМех РАН, 2020. – 384 с.
35. Полянин А. Д. Точные решения уравнений Навье–Стокса с обобщенным разделением переменных // Доклады Академии наук. – 2001. – Т. 380, № 4. – С. 491–496.
36. Полянин А. Д. Методы функционального разделения переменных и их применение в математической физике // Мат. моделирование и численные методы. – 2019. – № 1. – С. 65–97. – DOI: 10.18698/2309-3684-2019-1-6597.
37. Полянин А. Д., Журов А. И. Решения с функциональным разделением переменных двух классов нелинейных уравнений математической физики // Докл. АН. – 2019. – Т. 486, № 3. – С. 287–291. – DOI: 10.31857/S0869-56524863287-291.
38. Polyanin A. D., Zaitsev V. F. Handbook of nonlinear partial differential equations. – Boca Raton, London, New York : Chapman & Hall / CRC Press, 2004. – 840 p.

Received: 16.12.2022

Revised: 17.02.2023

Accepted: 28.02.2023

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.1.054-064

THE EFFECT OF ABRASIVE ADDITIVES ON THE TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF LUBRICANTS FOR THE WHEEL–RAIL SYSTEM

L. F. Koroleva^{1, a)}, R. A. Savrai^{1, b), *}, E. Yu. Prosviryakov^{1, c)}, V. A. Kostarev^{1, d)},
S. V. Pavlyshko^{1, e)}, and P. V. Kostarev^{2, f)}

¹*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

²*B.N. Yeltsin Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia*

- a)  <https://orcid.org/0000-0001-6650-7494>  lq@imach.uran.ru;
b)  <https://orcid.org/0000-0001-9873-3621>  ras@imach.uran.ru;
c)  <https://orcid.org/0000-0002-2349-7801>  evgen_pros@mail.ru;
d)  ksmtkt@gvaik.mail.com;
e)  <https://orcid.org/0000-0003-0526-8500>  psv@imach.uran.ru;
f)  ksmtkt@gvaik.mail.com

* Corresponding author. E-mail: ras@imach.uran.ru

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia
Tel.: +7 (343) 362 3014

The paper studies the polishing power of a tribochemically active abrasive material based on a solid solution of iron and aluminum oxides, as well as a solid solution of aluminum and iron oxides modified by zirconium oxide and yttrium oxide additives, and the tribotechnical properties of a lubricant doped with these abrasive materials. The modified $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ powders prove to have an essentially higher polishing power producing a considerably lower surface roughness than that of the unmodified $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ powder. By varying the content of the modifying oxides, one can change the tribochemical activity of the abrasive powder and select the best composition depending on the material to be polished. The addition of these abrasive powders is shown to have an essential effect on the tribotechnical properties of the lubricant for the wheel–rail contact. The laboratory testing of the lubricant compositions suggests their effective applicability to the wheel–rail contact.

Keywords: tribochemically active abrasive material, polishing ability, surface roughness, lubrication for the wheel–rail system, welding load, wear spot diameter.

Acknowledgment

This study was performed within the state assignments for the IES UB RAS, reg. Nos. AAAA-A18-118020790142-9 and AAAA-A18-118020790147-4.

Optical profilometry and tribotechnical tests were performed in Collective Use Center “Plastometriya” of the Institute of Engineering Science UB RAS.

References

1. Tuvshintur B., Vinokurov D.I., Yakimova G.A., Gozbenko V.E. Lubricants for the wheel–rail system. Solution of an excessive wear problem with production wastes used. *Systems. Methods. Technologies*, 2015, No. 3 (27), pp. 23–31. (In Russian).
2. Artemov A.S. Polishing nanodiamonds. *Physics of the Solid State*, 2004, vol. 46, pp. 687–695. DOI: 10.1134/1.1711453.

3. Jackson M.J., Mills B., Hitchiner M.P. Controlled wear of vitrified abrasive materials for precision grinding applications. *Sadhana*, 2003, vol. 28, No. 5, pp. 897–914. DOI: 10.1007/BF02703320.
4. Bakharev V.P. Dispersion of Ceramics and Composites in Diamond Finishing by Free Abrasive. *Russ. Engin. Res.*, 2009, vol. 29, No. 2, pp. 162–168. DOI: 10.3103/S1068798X09020129.
5. Filatov Y.D., Yashchuk V.P., Filatov A.Y., Heisel U., Storchak M. and Monteil G. Assessment of surface roughness and reflectance of nonmetallic products upon diamond abrasive finishing. *J. Superhard Mater.*, 2009, vol. 31, pp. 338–346 DOI: 10.3103/S1063457609050098 .
6. Storozhenko P.A., Guseinov Sh.L., and Malashin S.I. Nanodispersed powders: synthesis methods and practical applications. *Nanotekhnol. Russia*, 2009, vol. 4, Nos. 5–6, pp. 262–274. DOI: 10.1134/S1995078009050024.
7. Pokropivnyi V.V., Silenko P.M. Silicon carbide nanotubes and nanotubular fibers: synthesis, stability, structure and classification. *Theor. Exp. Chem.*, 2006, vol. 42, No. 1, pp. 3–15. DOI: 10.1007/s11237-006-0010-y.
8. Khanra A.K. Production of boron carbide powder by carbothermal synthesis of gel material. *Bull. Mater. Sci.*, 2007, vol. 30, No. 2, pp. 93–96. DOI: 10.1007/s12034-007-0016-7.
9. Bogdanov S.P. Influence of superstoichiometric boron on the synthesis of cubic boron nitride. *Glass Physics and Chemistry*, 2008, vol. 34, No. 3, pp. 336–339. DOI: 10.1134/S1087659608030164 .
10. Degtyareva E.V., Kabakova I.I., Skorodumova E.B., Armyanovskii V.E. An abrasive-resistant corundum ceramic for drawing microwires. *Refractories*, 1982, vol. 23, Nos. 1–2, pp. 82–87. DOI: 10.1007/BF01397952.
11. Garshin A.P., Gropyanov V.M., and Lagunov Yu.V. *Abrazivnye materialy* [Abrasive Materials]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1983. (In Russian).
12. Viktorov V.V., Fotiev A.A., and Badich V.D. Abrasive and Thermal Properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ Solid Solutions. *Inorg. Mater.*, vol. 32, No. 1, pp. 55–57.
13. Kotov Yu.A., Samatov O.M. Characteristics of aluminum oxide powders produced by impulse wire heating. *Poverkhnost*, 1994, nos. 10–14, pp. 90–94. (In Russian).
14. Belousov V.M., Chertov V.M., Rozhkova É.V., Litvin V.I. and Zazhigalov V.A. A sol-gel method for synthesizing porous iron-aluminum oxide substances and regulating their physicochemical characteristics. *Theor. Exp. Chem.*, 1997, vol. 33, No. 2, pp. 103–105. DOI: 10.1007/BF02765955.
15. Koroleva L.F. Tribochemical Activity of Mixed-Oxide Abrasive Materials in Metal Polishing. *Fiz. Khim. Obrab. Mater.*, 2006, No. 4, pp. 84–92. (In Russian).
16. Kim Nan-Hoon, Lim Jond-Heun, Kim Sang-Yong, Chang Eui-Goo. Semi-abrasive free slurry with acid colloidal silica for copper chemical mechanical planarization. *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 2005, vol. 16, pp. 629–632. DOI: 10.1007/s10854-005-3241-0 .
17. Marchenko E. A. *O prirode razrusheniya poverkhnosti metallov pri trenii* [On the Nature of Metal Surface Fracture in Friction]. Moscow, Nauka Publ., 1979. (In Russian).
18. Rebinder P.A. The significance of physicochemical processes in mechanical failure and processing of solids in engineering. *Vestnik AN SSSR*, 1940, No. 8, pp. 5–28. (In Russian).
19. Koroleva L.F. Modified nanoparticle oxides for final polishing. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2016, iss. 2, pp. 48–73. DOI: 10.17804/2410-9908.2016.2.048-073. Available at: http://dream-journal.org/DREAM_Issue_2_2016_Koroleva_L.F._048_073.pdf
20. Koroleva L.F. Synthesis and abrasive properties of nanoparticulate modified solid solutions of aluminum and iron oxides. *Inorganic Materials*, 2019, vol. 55 (6), pp. 556–562. DOI: 10.1134/S0020168519060074.
21. Koroleva L.F. Synthesis and abrasive properties of nanoparticulate MoO_2 -modified $\text{Al}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ and $\text{Fe}_{2-y}\text{Al}_y\text{O}_3$ solid solutions. *Inorg. Materials*, 2010, vol. 46, No. 12, pp. 1330–1336. DOI: 10.1134/S0020168510120113.
22. Koroleva L.F. Final polishing of metals to obtain nanoroughened surface. *Nanotechnologies in Russia*, 2012, vol. 7, Nos. 1–2, pp. 67–75. DOI: 10.1134/S1995078012010119.

23. Koroleva L.F. Nanoparticulate zirconia-modified solid solutions of aluminum-iron oxides for polishing titanium metal. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structure*, 2015, iss. 1, pp. 90–102. DOI: 10.17804/2410-9908. Available at: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_1_2015_Koroleva_L._F..pdf
24. Koroleva L.F. *Modifitsirovannye oksidy, oksidiroksid, shpineli khroma, dlya abrazivnykh i pigmentnykh materialov* [Modified Oxides, Oxyhydroxide, Chromium Spinels for Abrasive and Pigmentary Materials]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2002, 217 p. ISBN 5-7691-1236-0. (In Russian).
25. Koroleva L.F. Abrasive properties of aluminum iron oxide nanoparticles. *Inorganic Materials*, 2009, vol. 45 (10), pp. 1158–1165. DOI: 10.1134/S0020168509100148.
26. Isasi-Marín J., Pérez-Estébanez M., Díaz-Guerra C., Castillo J.F., Correcher V., Cuervo-Rodríguez M.R. Structural, magnetic and luminescent characteristics of Pr³⁺-doped ZrO₂ powders synthesized by a sol–gel method. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, vol. 42, No. 7. DOI: 10.1088/0022-3727/42/7/075418.

Подана в журнал: 16.12.2022

УДК 621.892.8:620.178.162



DOI: 10.17804/2410-9908.2023.1.054-064

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК АБРАЗИВНОГО МАТЕРИАЛА НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМАЗКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ «КОЛЕСО–РЕЛЬС»

Л. Ф. Королева^{1, а)}, Р. А. Саврай^{1, б), *}, Е. Ю. Просвирыков^{1, в)}, В. А. Костарев^{1, г)},
С. В. Павлышко^{1, д)}, П. В. Костарев^{2, е)}

¹Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия

- а)  <https://orcid.org/0000-0001-6650-7494>  lq@imach.uran.ru;
б)  <https://orcid.org/0000-0001-9873-3621>  ras@imach.uran.ru;
в)  <https://orcid.org/0000-0002-2349-7801>  evgen_pros@mail.ru;
г)  ksmtkt@gvaik.mail.com;
д)  <https://orcid.org/0000-0003-0526-8500>  psv@imach.uran.ru;
е)  ksmtkt@gvaik.mail.com

* Ответственный автор. Эл. почта: ras@imach.uran.ru

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

Тел.: +7 (343) 362–30–14

В работе исследованы полирующая способность трибохимически активного абразивного материала на основе твердого раствора оксидов железа и алюминия, а также твердого раствора оксидов алюминия и железа, модифицированного добавками оксидов циркония и иттрия, и триботехнические свойства смазки с добавками данных абразивных материалов. Установлено, что модифицированные порошки $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ обладают существенно более высокой полирующей способностью и обеспечивают существенно более низкую шероховатость поверхности, чем немодифицированный порошок $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$. При этом, варьируя содержание модифицирующих оксидов, можно менять трибохимическую активность абразивного порошка и подбирать наилучший состав в зависимости от полируемого материала. Показано, что добавка данных абразивных порошков оказывает существенное влияние на триботехнические свойства смазки для контакта «колесо–рельс». По результатам лабораторных испытаний исследуемых смазочных композиций можно предположить эффективность их использования для контакта «колесо–рельс».

Ключевые слова: трибохимически активный абразивный материал, полирующая способность, шероховатость поверхности, смазка для системы «колесо–рельс», нагрузка сваривания, диаметр пятна износа.

1. Введение

Смазка является одним из наиболее эффективных путей обеспечения надежности и долговечности подвижных сопряжений деталей машин и механизмов, минимизации энергетических потерь при их эксплуатации, обеспечения устойчивой работы сопряжений. Для снижения износа систем «колесо–рельс» железнодорожного транспорта также используются различные смазки. К смазкам, наносимым в зону трения «колесо–рельс», предъявляется широкий набор требований: в частности, эти смазки должны обладать высокими адгезионными, противозадирными, противоизносными и антикоррозионными свойствами, а также безопасностью и экологичностью [1]. Однако существующие смазки не в полной мере удовлетворя-

ют современным требованиям по износу железнодорожных рельсов и колес. При контакте колеса и рельса возникают силы, направляющие движение подвижного состава, так называемые силы крипа (от англ. creep – ползти). Они обусловлены тем, что материалы колеса и рельса не абсолютно твердые. В контакте наблюдаются микродеформации рельса и колеса, что определяет постепенное нарастание силы крипа с ростом относительного проскальзывания колеса по рельсу и соответствующим увеличением износа. Поэтому разработка новых смазочных композиций для использования в системе «колесо–рельс» является важнейшей научной и практической задачей.

Как правило, улучшение эксплуатационных характеристик смазок достигается за счет введения в их состав различных присадок. В этой связи в качестве добавки к смазке для рельсов и колес целесообразно рассмотреть возможность использования тонкодисперсных абразивных материалов, используемых для финишного полирования прецизионных изделий. Обычно для получения минимально шероховатой поверхности механическим полированием применяют абразивные дисперсные материалы с высокой твердостью, например наноалмазные порошки (как природные, так и синтетические), а также карбиды бора и кремния, кубический нитрид бора с зернистостью от 0,01–0,3 до 6–10 мкм; находят применение и ультрамикропорошки на основе корунда. При использовании этих материалов отмечаются длительность и многостадийность процесса, при котором доводочное полирование прецизионных изделий осуществляется за 3–5 операций с последовательным уменьшением зернистости абразива в составе паст и суспензий, используемых на операциях предварительной, чистовой и тонкой доводки [2–14]. Предыдущие исследования показали, что для получения шероховатости поверхности $Ra < 0,02$ мкм абразив должен обладать химической (трибохимической) активностью в процессе трения [15–18] и что для обеспечения высокой производительности и наношероховатости поверхности в процессе финишного полирования различных металлических материалов эффективно использование тонкозернистых трибохимически активных абразивных материалов [19–23]. Полирование с использованием таких абразивных материалов можно представить как совокупность процессов механического, адсорбционного, адгезионного смачивания и окисления поверхностного слоя. При этом абразивный материал, полученный методом термообработки аммонийных гидроксокарбонатов алюминия и железа, имеет более высокую полирующую способность, чем корунд или карбид бора [15, 19–23]. Исходя из уникальных полирующих свойств трибохимически активных абразивных материалов, можно ожидать, что добавка такого материала к маслу, смазывающему пару «колесо–рельс», окажется эффективной для повышения эксплуатационных характеристик смазки, однако этот вопрос до настоящего времени не был исследован. Поэтому целью данной работы явилось исследование полирующей способности трибохимически активного абразивного материала на основе твердого раствора оксидов железа и алюминия, а также твердого раствора оксидов алюминия и железа, модифицированного добавками оксидов циркония и иттрия, и триботехнических свойств смазки с добавками данных абразивных материалов.

2. Материал и методика эксперимента

Порошки на основе твердого раствора оксидов алюминия и железа ($Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$), а также твердого раствора оксидов алюминия и железа, модифицированного оксидами циркония и иттрия ($Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot ZrO_2 \cdot Y_2O_3$), получали термообработкой осажденных аммиачных гидроксокарбонатов в интервале температур 1000–1150 °С. В процессе осаждения вводили цирконил-ионы в виде 0,1 М раствора $ZrOSO_4$ и ионы иттрия в виде 0,1 М раствора YCl_3 . Концентрацию оксида железа в готовом продукте варьировали в интервале 0,12–0,2 мол. %, концентрацию оксидов циркония и иттрия – в интервале 0,005–0,01 мол. %. Концентрацию алюминия, железа, и модифицирующих оксидов в образцах определяли по стандартным методикам рентгенофлуоресцентного анализа с применением энергодисперсионного спектрометра Shimadzu EDX-900HS с относительной погрешностью $\pm 0,0005$ мол. %. Концентрацию

NH_4^+ определяли фотометрическим методом; концентрацию CO_3^{2-} определяли волнометрическим методом с улавливанием углекислого газа раствором щелочи после нагревания при 220–250 °С образцов, высушенных при комнатной температуре; концентрацию суммы OH^- и CO_3^{2-} групп определяли оксалатным методом. Различные аспекты синтеза порошков на основе твердого раствора оксидов железа и алюминия подробно рассмотрены в [21–26].

Для исследования фазового состава порошков применяли ИК-спектроскопический метод с использованием спектрофотометра Shimadzu JR-475 (порошки прессовали в таблетки с KBr) и рентгенофазовый анализ (РФА) с использованием дифрактометра STOE STADI-P с программой, включающей сопоставление дифракционных максимумов с данными картотеки JCPDS-JCDD PDF2, в CuK_α -излучении (никелевый фильтр), в области спектра 2θ от 5 до 70° с шагом сканирования 0,03° и подсчетом секунд от 5 до 25 для каждого шага. Гранулометрический состав порошков получали методом седиментации с помощью центрифугального седиментографа Shimadzu Analyzier SA-CP2 (вязкость дисперсионной среды 0,0093 П, плотность жидкой фазы 1,0 г/см³).

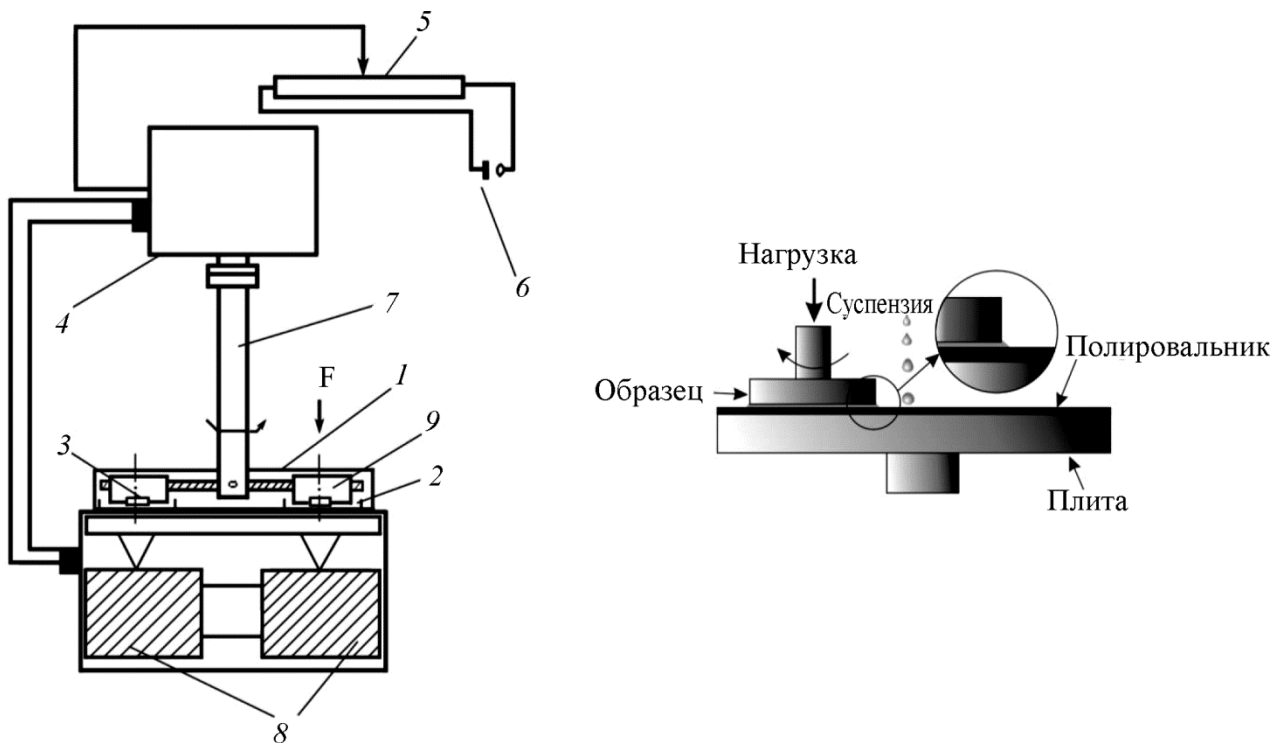


Рис. 1. Схема установки полирования: 1 – плита; 2 – лоток для полировальной пасты; 3 – образец; 4 – электродвигатель; 5 – резистор; 6 – источник энергии; 7 – шпиндель; 8 – электромагниты; 9 – нагрузка

Образцы для полирования изготавливали из рельсовой стали М76 (вырезали из рельса РП75). Начальное значение шероховатости образцов составило $R_a = 0,3\text{--}1,2$ мкм. Для моделирования процесса полирования была сконструирована лабораторная установка на базе вибрационно-полировального станка Metapolan-2 (рис. 1). Образцы помещали в специальные держатели на платформе, покрытой сукном, куда каждые 15 мин наносили полировальную пасту. Паста была подготовлена из абразивного порошка (10 г) и дистиллированной воды (90 мл) со значением рН среды, равным 7–8. Агломерация пасты отсутствовала в течение всего процесса полировки. Контактное давление составляло 12–18 кПа, вращение образцов осуществляли за счет вращения шпинделя от электродвигателя, скорость вращения составляла 89 об./мин (1,4 м/с). Абразивные свойства образцов в процессе полирования исследова-

ли согласно стандартным методикам измерения производительности (полирующей способности) и шероховатости поверхности Ra, оцениваемой с помощью оптического профилометра Wyko NT-1100 как среднее арифметическое значение неровностей профиля на базовой длине 0,08 мм. Производительность процесса полирования (полирующую способность) вычисляли по формуле

$$P = \frac{\Delta M}{S \cdot \tau}, \quad (1)$$

где ΔM – среднее изменение массы образцов в процессе полирования, мг; S – площадь полируемой поверхности образцов, см^2 ; τ – длительность полирования, мин.

Для триботехнических испытаний использовали смазку полужирную ПУМА для контакта «колесо–рельс» промышленного производства, в которую добавляли порошки $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ в различном количестве (табл. 1). Испытания в условиях трения скольжения по схеме четырех шариков проводили на машине трения ЧМТ-1. Условную нагрузку сваривания P_c определяли путем нагружения пирамиды из трех шариков диаметром 12,70 мм из стали ШХ-15 шариком такого же диаметра, вращающимся со скоростью 1460 об./мин. Режим нагружения – по 10 секунд с интервалом 50 кгс, начиная с нагрузки 100 кгс. За условную нагрузку сваривания принимали среднее значение между нагрузкой, предшествующей задиру, и нагрузкой, при которой произошел гарантированный задир. Диаметр пятна износа $D_{\text{и}}$ определяли в соответствии с ГОСТ 9490-75 путем нагружения пирамиды из шариков аналогично схеме, использованной при определении нагрузки сваривания. Режим нагружения – 60 минут с нагрузкой 20 кгс. За диаметр пятна износа принимали среднее арифметическое значение диаметров пятен износа трех шариков. Диаметр пятна износа каждого шарика определяли как среднее значение между большой и малой осями лунок износа.

Таблица 1

Состав исследуемых смазочных композиций

| Наименование образца | Состав образца |
|-----------------------|---|
| Образец № 1 (базовый) | Без добавки |
| Образец № 2 | 1 масс. % $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ |
| Образец № 3 | 0,5 масс. % $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ |
| Образец № 4 | 1,0 масс. % $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ |

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены кинетические кривые изменения полирующей способности, а на рис. 3 – кинетические кривые изменения шероховатости поверхности при полировании стали М76 порошками различного состава. Из этих данных видно, что модифицированные порошки $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ обладают существенно более высокой полирующей способностью и обеспечивают существенно более низкую шероховатость поверхности, чем немодифицированный порошок $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. При этом варьирование содержания ZrO_2 в составе модифицированного порошка также оказывает влияние и на полирующую способность, и на шероховатость поверхности. В частности, увеличение содержания ZrO_2 от 0,004 до 0,008 мол. % в составе модифицированного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ повышает его полирующую способность, но увеличивает шероховатость (снижает качество) полируемой поверхности. Это может быть обусловлено повышенной трибохимической активностью модифицированного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$, содержащего 0,008 моль % ZrO_2 . Следовательно, варьируя содержание модифицирующих оксидов, можно менять трибохимическую активность

абразивного порошка и подбирать наилучший состав в зависимости от полируемого материала.

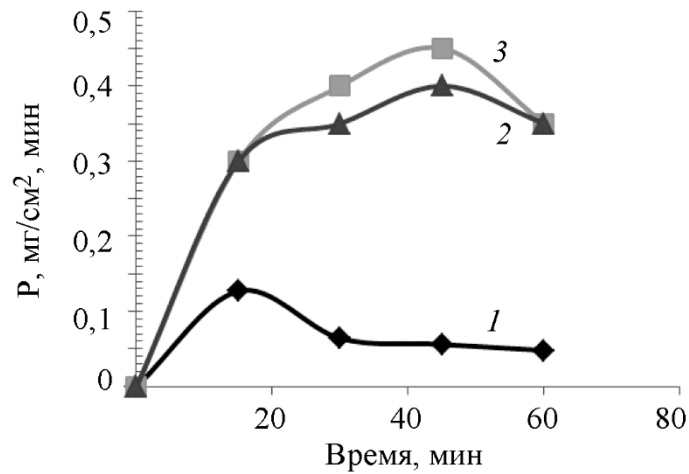


Рис. 2. Кинетические кривые изменения полирующей способности P при полировании стали М76 порошками $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (1) и $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ при содержании ZrO_2 в количестве 0,008 мол. % (2) и 0,004 мол. % (3)

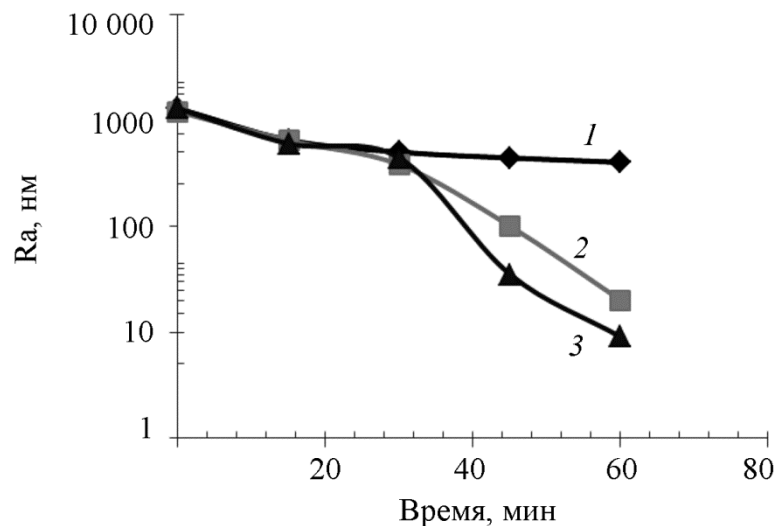


Рис. 3. Кинетические кривые изменения шероховатости R_a при полировании стали М76 порошками $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (1) и $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ при содержании ZrO_2 в количестве 0,008 мол. % (2) и 0,004 мол. % (3)

Результаты испытаний исследуемых смазочных композиций в условиях трения скольжения по схеме четырех шариков представлены в табл. 2. Из этих данных видно, что добавка порошков $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ оказывает существенное влияние на триботехнические свойства смазки ПУМА для контакта «колесо–рельс». В частности, смазочная композиция с добавкой 1 масс. % $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ демонстрирует увеличение условной нагрузки сваривания на 26,7 % по сравнению с испытаниями базового образца, однако при этом наблюдается увеличение диаметра пятна износа на 48,3 %. Следовательно, данная смазочная композиция обладает более высокими антизадирными свойствами, но более низкими противоизносными свойствами по сравнению с базовым образцом. Смазочная композиция с добавкой 0,5 масс. % $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ демонстрирует сохранение условной нагрузки сваривания на том же уровне по сравнению с испытаниями базового образца, однако при

этом наблюдается увеличение диаметра пятна износа на 12,7 %. Следовательно, данная смазочная композиция обладает близкими антизадирными свойствами, но более низкими противоизносными свойствами по сравнению с базовым образцом. Смазочная композиция с добавкой 1,0 масс. % $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ демонстрирует уменьшение условной нагрузки сваривания на 33,3 % по сравнению с испытаниями базового образца, и при этом наблюдается увеличение диаметра пятна износа на 20 %. Следовательно, данная смазочная композиция обладает более низкими антизадирными свойствами и более низкими противоизносными свойствами по сравнению с базовым образцом.

Таблица 2

Условная нагрузка сваривания P_c и диаметр пятна износа $D_{и}$ при испытаниях исследуемых смазочных композиций в условиях трения скольжения по схеме четырех шариков

| Наименование образца | P_c , кгс | $D_{и}$, мм |
|-----------------------|-------------|--------------|
| Образец № 1 (базовый) | 750 | 0,300 |
| Образец № 2 | 950 | 0,445 |
| Образец № 3 | 750 | 0,338 |
| Образец № 4 | 500 | 0,360 |

Важно отметить, что повышение нагрузки сваривания и увеличение диаметра пятна износа характерно для абразивных присадок, что и наблюдается у смазочной композиции с добавкой 1 масс. % $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. Отсутствие роста или уменьшение условной нагрузки сваривания для смазочных композиций с добавкой $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ может быть обусловлено ростом адгезии в паре трения за счет снижения шероховатости трущихся поверхностей под воздействием трибохимически активного абразивного материала (см. рис. 3). Отметим также, что, несмотря на существенно более высокую полирующую способность модифицированных порошков $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ (см. рис. 2), диаметр пятна износа у смазочных композиций с добавкой данных порошков существенно ниже, чем у смазочной композиции с добавкой немодифицированного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (см. табл. 2). Таким образом, по результатам лабораторных испытаний исследуемых смазочных композиций можно предположить эффективность их использования для контакта «колесо–рельс». Однако, чтобы сделать однозначный вывод, необходимы испытания, приближенные к реальным условиям эксплуатации, или натурные испытания.

4. Заключение

Исследованы полирующая способность трибохимически активного абразивного материала на основе твердого раствора оксидов железа и алюминия, а также твердого раствора оксидов алюминия и железа, модифицированного добавками оксидов циркония и иттрия, и триботехнические свойства смазки с добавками данных абразивных материалов.

Установлено, что модифицированные порошки $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ обладают существенно более высокой полирующей способностью и обеспечивают существенно более низкую шероховатость поверхности, чем немодифицированный порошок $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. При этом варьирование содержания ZrO_2 в составе модифицированного порошка также оказывает влияние и на полирующую способность, и на шероховатость поверхности. В частности, увеличение содержания ZrO_2 от 0,004 до 0,008 мол. % в составе модифицированного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ повышает его полирующую способность, но увеличивает шероховатость (снижает качество) полируемой поверхности. Это может быть обусловлено повышенной трибохимической активностью модифицированного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$, содержащего 0,008 мол. % ZrO_2 . Следовательно, варьируя содержа-

ние модифицирующих оксидов, можно менять трибохимическую активность абразивного порошка и подбирать наилучший состав в зависимости от полируемого материала.

Показано, что добавка порошков $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ и $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ оказывает существенное влияние на триботехнические свойства смазки ПУМА для контакта «колесо–рельс». В частности, смазочная композиция с добавкой 1 масс. % $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ демонстрирует увеличение условной нагрузки сваривания на 26,7 % по сравнению с испытаниями базового образца, однако при этом наблюдается увеличение диаметра пятна износа на 48,3 %. Смазочная композиция с добавкой 0,5 масс. % $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ демонстрирует сохранение условной нагрузки сваривания на том же уровне по сравнению с испытаниями базового образца, однако при этом наблюдается увеличение диаметра пятна износа на 12,7 %. Смазочная композиция с добавкой 1,0 масс. % $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ демонстрирует уменьшение условной нагрузки сваривания на 33,3 % по сравнению с испытаниями базового образца, и при этом наблюдается увеличение диаметра пятна износа на 20 %. Таким образом, по результатам лабораторных испытаний исследуемых смазочных композиций можно предположить эффективность их использования для контакта «колесо–рельс». Однако, чтобы сделать однозначный вывод, необходимы испытания, приближенные к реальным условиям эксплуатации, или натурные испытания.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по темам № АААА-А18-118020790142-9 и № АААА-А18-118020790147-4.

Оптическая профилометрия и триботехнические испытания выполнены в ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Литература

1. Применение смазки для системы «колесо–рельс». Решение проблемы износа с использованием отходов производства / Б. Тувшинтур, Д. И. Винокуров, Г. А. Якимова, В. Е. Гозбенко // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 3 (27). – С. 23–31.
2. Artemov A. S. Polishing nanodiamonds // Phys. Solid State. – 2004. – Vol. 46. – P. 687–695. – DOI: 10.1134/1.1711453.
3. Jackson M. J., Mills B., Hitchiner M. P. Controlled wear of vitrified abrasive materials for precision grinding applications // Sadhana. – 2003. – Vol. 28, No. 5. – P. 897–914. – DOI: 10.1007/BF02703320.
4. Bakharev V. P. Dispersion of Ceramics and Composites in Diamond Finishing by Free Abrasive // Russ. Engin. Res. – 2009. – Vol. 29, No. 2. – P. 162–168. – DOI: 10.3103/S1068798X09020129.
5. Assessment of surface roughness and reflectance of nonmetallic products upon diamond abrasive finishing / Yu. D. Filatov, V. P. Yashchuk, A. Yu. Filatov, U. Heisel, M. Storchak and G. Monteil // J. Superhard Mater. – 2009. – Vol. 31. – P. 338–346 – DOI: 10.3103/S1063457609050098.
6. Storozhenko P. A., Guseinov Sh. L., and Malashin S. I. Nanodispersed powders: synthesis methods and practical applications // Nanotekhnol. Russia. – 2009. – Vol. 4, Nos. 5–6. – P. 262–274. – DOI: 10.1134/S1995078009050024.
7. Pokropivnyi V. V., Silenko P. M. Silicon carbide nanotubes and nanotubular fibers: synthesis, stability, structure and classification // Theor. Exp. Chem. – 2006. – Vol. 42, No. 1. – P. 3–15. – DOI: 10.1007/s11237-006-0010-y.
8. Khanra A. K. Production of boron carbide powder by carbothermal synthesis of gel material // Bull. Mater. Sci. – 2007. – Vol. 30, No. 2. – P. 93–96. – DOI: 10.1007/s12034-007-0016-7.
9. Bogdanov S. P. Influence of superstoichiometric boron on the Synthesis of cubic Boron nitride // Glass Physics and Chemistry. – 2008. – Vol. 34, No. 3. – P. 336–339. – DOI: 10.1134/S1087659608030164.

10. An abrasive-resistant corundum ceramic for drawing microwires / E. V. Degtyareva, I. I. Kabakova, E. B. Skorodumova, V. E. Armyanovskii // *Refractories*. – 1982. – Vol. 23, Nos. 1–2. – P. 82–87. – DOI: 10.1007/BF01397952.
11. Гаршин А. П., Гропянов В. М., Лагунов Ю. В. Абразивные материалы. – Л. : Машиностроение, 1983. – 230 с.
12. Viktorov V. V., Fotiev A. A., and Badich V. D. Abrasive and Thermal Properties of Al_2O_3 – Cr_2O_3 Solid Solutions // *Inorg. Mater.* – 1996. – Vol. 32, No. 1. – P. 55–57.
13. Котов Ю. А., Саматов О. М. Характеристики порошков оксида алюминия, полученных импульсным нагревом проволоки // *Поверхность*. – 1994. – № 10–14. – С. 90–94.
14. A sol-gel method for synthesizing porous iron-aluminum oxide substances and regulating their physicochemical characteristics / V. M. Belousov, V. M. Chertov, É. V. Rozhkova, V. I. Litvin and V. A. Zazhigalov // *Theor. Exp. Chem.* – 1997. – Vol. 33, No. 2. – P. 103–105. – DOI: 10.1007/BF02765955.
15. Королева Л. Ф. Трибохимическая активность абразивных материалов на основе смешанных оксидов в процессе полирования металлов // *Физика и химия обработки материалов*. – 2006. – № 4. – С. 84–92.
16. Semi-abrasive free slurry with acid colloidal silica for copper chemical mechanical planarization / Nan-Hoon Kim, Jond-Heun Lim, Sang-Yong Kim, Eui-Goo Chang // *Journal of Material Science: Materials in Electronics*. – 2005. – Vol. 16. – P. 629–632. – DOI: 10.1007/s10854-005-3241-0.
17. Марченко Е. А. О природе разрушения поверхности металлов при трении. – М. : Наука, 1979. – 118 с.
18. Ребиндер П. А. Значение физико-химических процессов при механическом разрушении и обработке твердых тел в технике // *Вестник АН СССР*. – 1940. – № 8. – С. 5–28.
19. Koroleva L. F. Modified Nanoparticle Oxides for Final Polishing // *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2016. – Iss. 2. – P. 48–73. – DOI: 10.17804/2410-9908.2016.2.048-073. – URL: http://dream-journal.org/DREAM_Issue_2_2016_Koroleva_L.F._048_073.pdf
20. Koroleva L. F. Synthesis and abrasive properties of nanoparticulate modified solid solutions of aluminum and iron oxides // *Inorganic Materials*. – 2019. – Vol. 55 (6). – P. 556–562. – DOI: 10.1134/S0020168519060074.
21. Koroleva L. F. Synthesis and abrasive properties of nanoparticulate MoO_2 -modified $Al_{2-x}Fe_xO_3$ and $Fe_{2-y}Al_yO_3$ solid solutions // *Inorg. Materials*. – 2010. – Vol. 46, No. 12. – P. 1330–1336. – DOI: 10.1134/S0020168510120113. – ISSN 0020-1685.
22. Koroleva L. F. Final polishing of metals to obtain nanoroughened surface // *Nanotechnologies in Russia*. – 2012. – Vol. 7, Nos. 1–2. – P. 67–75. – DOI: 10.1134/S1995078012010119.
23. Koroleva L. F. Nanoparticulate zirconia-modified solid solutions of aluminum-iron oxides for polishing titanium metal // *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structure*. – 2015. – Iss. 1. – P. 90–102. – DOI: 10.17804/2410-9908. – URL: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_1_2015_Koroleva_L._F..pdf
24. Королева Л. Ф. Модифицированные оксиды, оксигидроксид, шпинели хрома для абразивных и пигментных материалов. – Екатеринбург : УрО РАН, 2002. – 214 с.
25. Koroleva L. F. Abrasive properties of aluminum iron oxide nanoparticles // *Inorg. Materials*. – 2009. – Vol. 45, No. 10. – P. 1158–1165. – DOI: 10.1134/S0020168509100148.
26. Structural, magnetic and luminescent characteristics of Pr^{3+} -doped ZrO_2 powders synthesized by a sol-gel method / J. Isasi-Marín, M. Pérez-Estébanez, C. Díaz-Guerra, J. F. Castillo, V. Correcher, M. R. Cuervo-Rodríguez // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2009. – Vol. 42, No. 7. – DOI: 10.1088/0022-3727/42/7/075418.