

DREAM

<http://dream-journal.org>

ISSN 2410-9908

DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2

Diagnostics, Resource and Mechanics
of materials and structures

<http://dream-journal.org>

2,2020

March-April

Editor-in-Chief: **Eduard S. Gorkunov**, RAS Academician (Russia)
Deputy Editors-in-Chief: **Sergey V. Smirnov**, **Sergey V. Gladkovsky**

Editorial Council

Chairman: **Eduard S. Gorkunov**, RAS Academician (Russia)

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)
Mitko M. Mihovski (Bulgaria)
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)
Aleksandr K. Belyaev (St.-Peterburg)
Vera V. Berezovskaya (Ekaterinburg)
Sergey V. Burov (Ekaterinburg)
Vladimir O. Vaskovsky (Ekaterinburg)
Dmitry I. Vichuzhanin (Ekaterinburg)
Mladen N. Georgiev (Sofia, Bulgaria)
Vladimir G. Degtyar (Miass)
Igor G. Emelyanov (Ekaterinburg)
Sergey M. Zadvorkin (Ekaterinburg)
Alexander G. Zalazinsky (Ekaterinburg)
Anatoly V. Konvalov (Ekaterinburg)
Vladimir N. Kostin (Ekaterinburg)
Aleksey V. Makarov (Ekaterinburg)
Vladimir A. Mironov (Ekaterinburg)
Radik R. Mulyukov (Ufa)
Vitaly V. Muravyov (Izhevsk)
Aleksandr P. Nichipuruk (Ekaterinburg)
Oleg A. Plekhov (Perm)
Anna M. Povlotskaya (Ekaterinburg)
Evgenii Yu. Prosviryakov (Ekaterinburg)
Nataliya B. Pugacheva (Ekaterinburg)
Igor Yu. Pyshmintsev (Chelyabinsk)
Anatoly B. Rinkevich (Ekaterinburg)
Roman A. Savray (Ekaterinburg)
Alexander S. Smirnov (Ekaterinburg)
Yury V. Subachev (Ekaterinburg)
Alexander I. Ulyanov (Izhevsk)
Yulia V. Khudorozhkova (Ekaterinburg)

Elena E. Verstakova, editor of the English translation
Irina M. Tsiklina, 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: Горкунов Эдуард Степанович – академик РАН, д.т.н.
Заместители главного редактора: **Сергей Витальевич Смирнов**, д.т.н.; **Сергей Викторович Гладковский**, д.т.н.

Редакционный совет:

Председатель совета – Горкунов Эдуард Степанович, академик РАН, д.т.н. (Россия)

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)
Миховски Митко Минков, д.т.н. (Республика Болгария)
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:

Главный редактор – **Горкунов Эдуард Степанович**, академик РАН, д.т.н. (Екатеринбург)

Зам. главного редактора – **Смирнов Сергей Витальевич**, д.т.н. (Екатеринбург)

Зам. главного редактора – **Гладковский Сергей Викторович**, д.т.н. (Екатеринбург)

Артемьев Борис Викторович, д.т.н., (Москва)
Батаев Владимир Андреевич, д.т.н. (Новосибирск)
Беляев Александр Константинович, член-корр. РАН, д.ф.-м.н., (Санкт-Петербург)
Березовская Вера Владимировна, д.т.н., (Екатеринбург)
Буров Сергей Владимирович, к.т.н. (Екатеринбург)
Васьковский Владимир Олегович, д.ф.-м.н. (Екатеринбург)
Вичужанин Дмитрий Иванович, к.т.н. (Екатеринбург)
Георгиев Младен Николов, д.т.н. (София, Республика Болгария)
Дегтярь Владимир Григорьевич, академик РАН, д.т.н. (Миасс)
Емельянов Игорь Георгиевич, д.т.н. (Екатеринбург)
Задворкин Сергей Михайлович, к.ф.-м.н. (Екатеринбург)
Залазиский Александр Георгиевич, д.т.н. (Екатеринбург)
Коновалов Анатолий Владимирович, д.т.н. (Екатеринбург)
Костин Владимир Николаевич, д.т.н. (Екатеринбург)
Макаров Алексей Викторович, член-корр. РАН, д.т.н. (Екатеринбург)
Миронов Владимир Александрович, д.м.н. (Екатеринбург)
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, д.ф.-м.н. (Пермь)
Поволоцкая Анна Моисеевна, к.т.н. (Екатеринбург)
Просвиряков Евгений Юрьевич, д.ф.-м.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)
Субачев Юрий Владимирович, 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
Циклина Ирина Михайловна – 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

Gladkovsky S. V., Nedzvetsky P. D., Vichuzhanin D. I., Kuteneva S. V., and Lepikhin S. V. Brittle fracture resistance and damping properties of a steel-rubber metal-polymer composite	6
Makarov G. N., Grib V. V. and Shalygin M. G. Increasing load-carrying ability of gear couplings	19
Gizhevskii B. A., Degtyarev M. V., Chashchukhina T. I., Voronova L. M., Patrakov E. I., Melnikov N. N., Zapariy Vas. V., Ruzaev S. V., Zapariy Vl. V. Fractographic study of the armor steel of self-propelled artillery guns of the red army	26
Pugacheva N. B. and Bykova T. M. A study of boriding methods, an analysis of the structure and properties of the obtained coatings	38
Burmasheva N. V. and Prosviryakov E. Yu. Exact solution for describing a unidirectional Marangoni flow of a viscous incompressible fluid with the Navier boundary condition. Pressure field investigation	61

СОДЕРЖАНИЕ

Гладковский С. В., Недзвецкий П. Д., Вичужанин Д. И., Кутенева С. В., Лепихин С. В. Сопротивление хрупкому разрушению и демпфирующие свойства металлополимерного композита типа «сталь–резина»	6
Макаров Г. Н., Гриб В. В., Шалыгин М. Г. Повышение нагрузочной способности зубчатых муфт	19
Гижевский Б. А., Дегтярев М. В., Чашухина Т. И., Воронова Л. М., Патраков Е. И., Мельников Н. Н., Запарий Вас. В., Рузаев С. В., Запарий Вл. В. Фрактографическое исследование броневой стали самоходных артиллерийских установок красной армии	26
Пугачева Н. Б., Быкова Т. М. Исследование методов борирования, анализ структуры и свойств получаемых покрытий	38
Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю. Точное решение для описания однонаправленного течения Марангони вязкой несжимаемой жидкости с граничным условием Навье: исследование поля давления	61

Received: 15.01.2020

Revised: 12.02.2020

Accepted: 06.03.2020

DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.006-018

BRITTLE FRACTURE RESISTANCE AND DAMPING PROPERTIES OF A STEEL-RUBBER METAL-POLYMER COMPOSITE

S. V. Gladkovsky^{a)*}, P. D. Nedzvetsky^{b)}, D. I. Vichuzhanin^{c)},
S. V. Kuteneva^{d)}, and S. V. Lepikhin^{e)}

- a)  <http://orcid.org/0000-0002-3542-6242>  gsv@imach.uran.ru;
b)  <http://orcid.org/0000-0001-8546-5496>  paveltag777@gmail.com;
c)  <http://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  mmm@imach.uran.ru;
d)  <http://orcid.org/0000-0003-4503-5488>  esv@imach.uran.ru;
e)  <http://orcid.org/0000-0002-0240-2164>  lsv@imach.uran.ru

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

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

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, 620049, Ekaterinburg, Russian Federation

Tel.: +7 (343) 362 34 48; fax: +7 (343) 374 53 30

The results of comparative tests for impact bending of 09G2S steel specimens and a cold-glued 3-layer “09G2S steel–1F-1-HFAA-C rubber” composite show that, unlike the base steel, the metal-polymer composite retains increased values of impact strength KCV at temperatures ranging from 20 to –60 °C. The high level of the brittle fracture resistance of the steel-rubber composite under dynamic loading conditions at low temperatures results from the development of the delamination toughening effect characteristic of layered materials. The 100-cycle alternating tests and processing of their results have made it possible to construct mechanical hysteresis loops for the steel base and the metal-polymer composite and to determine the main parameters governing the damping capacity of the materials (the values of the mechanical loss angle tangent and the components of the complex elastic modulus). The possibility of using the metal-polymer composite under study, which is highly resistant to brittle fracture at low climatic temperatures, in highly vibration-resistant structural components of transport systems is demonstrated.

Keywords: low-carbon steel, frost-resistant rubber, microstructure, impact strength, mechanical hysteresis loops, dynamic-mechanical analysis, damping properties.

Acknowledgment

We appreciate the assistance of V. G. Starkov (IES UB RAS) in making composite material specimens.

The work was done with the use of the equipment installed at the Plastometriya collective use center affiliated to the IES UB RAS; it was performed under the state assignment for the IES UB RAS, theme No. AAAA-A18-118020790147-4 and supported by UB RAS project No. 18-9-1-20 (the Arctic program).

References

1. Gladkovsky S.V., Kuteneva S.V., Kamantsev I.S., Galeev R.M., Sergeev S.N., Dvoynikov D.A. Formation of the Mechanical Properties and Fracture Resistance Characteristics of Sandwich Composites Based on the 09G2S Steel and the EP678 High-Strength Steel of Various Dispersion.

- Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, iss. 6, pp. 71–90. DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.071-090.
2. Gladkovskii S.V., Kamantsev I.S., Kuteneva S.V., Dvoynikov D.A., Kuznetsov A.V. Layered Metal Composites with High Resistance to Brittle Fracture at Low Temperatures. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2053, 020003. DOI: 10.1063/1.5084349.
 3. Gladkovsky S.V., Kuteneva S.V., Sergeev S.N. Microstructure and mechanical properties of sandwich copper/steel composites produced by explosive welding. *Materials Characterization*, 2019, vol. 154, pp. 294–303. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.06.008.
 4. Chawla K.N. *Composite Materials Science and Engineering*, 4th ed., Department of Materials Science and Engineering, The University of Alabama at Birmingham, Birmingham, USA, 2019, 557 p. DOI: 10.1007/978-3-030-28983-6.
 5. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE “VIAM” SSC RF on the implementation of “Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030”. *Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33. (In Russian).
 6. Meure S., Varley R.J., Dong Yang Wu, Mayo S., Nairn K., Furman S. Confirmation of the healing mechanism in a mendable EMAA-epoxy resin. *European Polymer Journal*, 2012, vol. 48, pp. 524–531. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2011.11.021.
 7. Chernikov S.A. Expansion of the suppression band of a vibroprotective system by a feedback dynamic damper. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2015, vol. 44, no. 5, pp. 439–444. DOI: 10.3103/S1052618815050052.
 8. Ponomarev Yu.K. and Ulanov A.M. Comparison of Russian and Foreign Vibration Insulators Made of Wire Damping Materials. *Izv. SNTs RAN*, 2009, vol. 11, no. 3, pp. 214–218. (In Russian).
 9. Tipalin S.A., Saprytkin B.Yu., Shpunkin N.F. Overview of the multi-layer sheet deformable materials for protection against noise. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2012, no. 2, pp. 194–199. (In Russian).
 10. Kolodkin M.N., Zaytsev A.A. Long-range designs for underground rail tracks. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 2012, nos. 40–41, pp. 74–76. (In Russian).
 11. Verbilov A.F., Kovalev V.V., Ulrich S. A. Nonlinear oscillation processes in the dynamics of the caterpillar drive with rubber-metal pin joint. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*, 2018, no. 6, pp. 243–247. (In Russian).
 12. Antipov V.V., Chesnokov D.V., Kozlov I.A., Volkov I.A., Petrova A.P. Surface preparation aluminum alloy V-1469 before use in the composition of layered hybrid material. *Trudy VIAM*, 2018, no. 64, pp. 59–65. DOI: 10.18577 / 2307-6046-2018-0-4-59-65. (In Russian).
 13. Sagomonova V.A., Kislyakova V.I., Tyumeneva T.Yu., Bolshakov V.A. The influence of vibration damping materials' composition on their mechanical loss factor. In: *Trudy VIAM*, 2015, no. 10, pp. 63–69. (In Russian).
 14. Sytyj Yu.V., Sagomonova V.A., Kislyakova V.I., Bol'shakov V.A. Novel vibroabsorbing materials. In: *Trudy VIAM*, 2012, no. 3, pp. 51–54 (In Russian).
 15. Ponomarev Y.K., Ulanov A.M. Comparison of Russian and Foreign Vibration Insulators Made of Wire Damping Materials. *Izv. SNTs RAN*, 2009, vol. 11, no. 3, pp. 214–218. (In Russian).
 16. Solomatov V.I., Cherkasov V.D., Fomin N.E. *Vibropogloshchayushchie kompozitsionnye materialy* [Vibration absorbing composite materials]. Saransk, Izd-vo Mordovskogo un-ta Publ., 2001, 95 p. (In Russian).
 17. Embury J.D., Petch N.J, Wright E.S. Fracture of mild steel laminates. *Transactions of the Society of Mining Engineers of AIME*, 1967, vol. 239 (1), pp. 114–18.
 18. Babinsky K., Primig S., Knabl W., Lorich A., Stickler R., Clemens H. Fracture Behavior and Delamination Toughening of Molybdenum in Charpy Impact Tests. *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*, 2016, vol. 68, iss. 11, pp. 2854–2863. DOI: 10.1007/s11837-016-2075-y.

Подана в журнал: 15.01.2020
УДК 621.792.4-053:620.178.746.22:539.67
DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.006-018

СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ И ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА ТИПА «СТАЛЬ–РЕЗИНА»

С. В. Гладковский^{а)*}, П. Д. Недзвецкий^{б)}, Д. И. Вичужанин^{в)},
С. В. Кутенева^{г)}, С. В. Лепихин^{д)}

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

- ^{а)}  <http://orcid.org/0000-0002-3542-6242>  gsv@imach.uran.ru;
^{б)}  <http://orcid.org/0000-0001-8546-5496>  paveltag777@gmail.com;
^{в)}  <http://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  mmm@imach.uran.ru;
^{г)}  <http://orcid.org/0000-0003-4503-5488>  esv@imach.uran.ru;
^{д)}  <http://orcid.org/0000-0002-0240-2164>  lsv@imach.uran.ru

* Ответственный автор. Электронная почта: gsv@imach.uran.ru
Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация
Тел.: +7 (343) 362–42–17, факс: +7 (343) 374–53–30

По результатам сравнительных испытаний на ударный изгиб образцов из стали 09Г2С и полученного методом холодного склеивания 3-слойного композита «Сталь 09Г2С–резина 1Ф-1-ТМКЩ-С» сделан вывод, что в отличие от стали основы металлополимерный композит сохраняет повышенные значения ударной вязкости KCV в интервале температур от +20 до –60 °С. Высокий уровень сопротивления хрупкому разрушению композита типа «сталь–резина» в условиях динамического нагружения при пониженных температурах связывается с проявлением характерного для материалов со слоистым строением эффекта «вязкости расслоения». Проведенные знакопеременные циклические испытания на базе 100 циклов и обработка их результатов позволили построить для стали основы и металлополимерного композита петли механического гистерезиса и оценить основные параметры, определяющие демпфирующую способность изученных материалов (значения тангенса угла механических потерь и компонент комплексного модуля упругости). Показана возможность использования изученного слоистого композита, обладающего повышенным сопротивлением хрупкому разрушению в области низких климатических температур, а также в элементах конструкций транспортных систем с высокой вибрационной стойкостью.

Ключевые слова: слоистый композит, низкоуглеродистая сталь, морозостойкая резина микроструктура, ударная вязкость, петли механического гистерезиса, динамический механический анализ, демпфирующие свойства.

1. Введение

Широкое применение в авиастроительной, космической и автомобилестроительной областях находят металлополимерные композиционные материалы [1–6]. Данные композиты обладают низкой плотностью, высокой удельной жесткостью и прочностью, повышенной стойкостью в агрессивных средах, обладают одновременно и ярко выраженными вязкоупругими свойствами, что позволяет применять их в качестве вибродемпфирующих элементов и отказаться от создания специализированных систем демпфирования [7–10]. Придание особых свойств материалам, таких как повышенные диссипативные свойства, позволят успешно

применять их в области транспортных систем. В этом случае демпфирующая способность композиционных материалов рассматривается не как второстепенный эффект, а как один из основных параметров проектирования [11]. Значительный практический интерес представляет одна из разновидностей металлополимерных композиционных материалов – слоистые композиты типа «сталь–резина». Одним из основных способов, применяемых для получения композитов данного типа, является метод холодного клеевого соединения [12]. Применение композиционных материалов на основе металлов и резины возможно в области строительства железнодорожных дорог для высокоскоростных перевозок [10]. В связи с этим наше исследование посвящено изучению характеристик ударной вязкости при комнатной и пониженных температурах, а также демпфирующих свойств слоистых клееных композиционных материалов на основе стали 09Г2С с прослойками из морозостойкой резины 1Ф-1-ТМКЩ-С.

2. Материалы и методы исследования

Для изготовления клееного композита были выбраны полосы из резины 1Ф-1-ТМКЩ-С различной толщины, химический состав и механические свойства которой соответствовали ГОСТ 7338-90. Согласно указанному ГОСТу резина была поставлена в форме пластин 1-го класса, вида Ф, типа I, марки ТМКЩ, степени твердости С. Температурные интервалы эксплуатации и механические свойства этой резины представлены в табл. 1. Выбор резины в составе композита определялся достаточно широким интервалом рабочих температур, а также с возможностью сохранения свойств резины в агрессивных средах. Резина марки ТМКЩ относится к классу тепломорозокислощелочестойких.

Таблица 1 – Рабочие температуры и механические свойства полос резины 1Ф-1-ТМКЩ-С согласно ГОСТ 7338-90

Марка резины	Температурный интервал, °С	σ_b , МПа	δ , %	Твердость по Шору
ТМКЩ	От –60 до +80	5	250	50–65

Исходные полосы 09Г2С были обрезаны под размеры образцов для испытаний на удар и растяжение–сжатие. Химический состав стали 09Г2С был определен на оптическом эмиссионном спектрометре SPECTROMAXx (табл. 2). Исходные полосы из стали 09Г2С подвергались предварительной нормализации (нагреву выше точки A_{c3} до температуры 920 °С, выдержке 1 ч и последующему охлаждению на воздухе).

Таблица 2 – Химический состав стали 09Г2С, используемой для создания композита

Содержание элементов, мас. %									
С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	S	P
0,12	0,68	1,32	0,07	0,07	0,01	0,04	0,12	0,01	0,02

Микроструктуру исходной стали 09Г2С исследовали с помощью оптического микроскопа НЕОРНОТ-21 при увеличении $\times 800$. Травление микрошлифа проводилось химическим способом в 3 %-м спиртовом растворе азотной кислоты. Испытания на растяжение стали 09Г2С проводили при комнатной температуре на универсальной испытательной машине INSTRON8801 в соответствии с рекомендациями ГОСТ 1497-84 на плоских образцах типа I толщиной 5 мм.

Для склеивания слоев композита был использован клей на основе эпоксидной смолы с добавлением специальных биофункциональных соединений, что обеспечило сохранение повышенной прочности сцепления слоев в диапазоне температур от +20 до –60 °С.

Перед склеиванием полосы 09Г2С были очищены, обезжирены, обработаны пескоструйной обработкой и протравлены в течение 15–20 мин при температуре 70–75 °С раствором из 3,5 весовых частей бихромата натрия в 3,5 весовых частей дистиллированной воды и 200 весовых частей концентрированной серной кислоты. После травления поверхность была тщательно промыта водой и высушена. Заранее вулканизированные полосы из резины обрезаются под размер образцов для испытаний на удар и растяжение–сжатие. Затем поверхность резины была обезжирена с целью удаления талька, а также масел. После подготовки поверхности на нее был нанесен клей с размешанным отвердителем. После процесса склеивания образцы были оставлены до полного высыхания клея при комнатной температуре в течение 2 суток. В результате склеивания были получены 3-слойные образцы композитов с содержанием резины 1Ф-1-ТМКЩ-С 20 %. Схема сборки композита представлена на рис. 1.

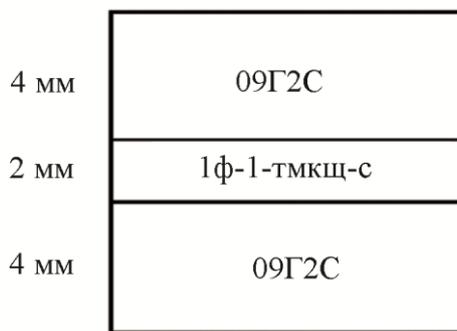


Рис. 1. Схема укладки слоев 3-слойного композита на основе стали 09Г2С и резины 1Ф-1-ТМКЩ-С. Цифрами слева отмечена толщина слоев в миллиметрах.

Методика получения соединения – холодное склеивание

Испытания на ударную вязкость проводились при температурах +20 и –60 С на инструментированном маятниковом копре ИТ 542М фирмы «Tinius Olsen» на стандартных образцах типа 11 размером 10×10×55 мм с V-образным надрезом по «тормозящему типу». Разброс полученных значений не превышал 5 %. Фрактографический анализ поверхности изломов композита после механических испытаний проводили на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA II XMU.

Метод динамического механического анализа (ДМА) [13–16] позволяет получить информацию об изменении таких характеристик, как тангенс угла механических потерь ($\text{tg}\delta$), компонент комплексного модуля упругости (модуль упругости (E'), модуль вязкости (E'')) под воздействием периодической, синусоидальной динамической нагрузки [13]. Данные характеристики определяют демпфирующую способность материалов. Определение характеристик демпфирования материалов при растяжении–сжатии регламентировано стандартом DIN 53513. Оценка демпфирующей способности образцов слоистых металлополимерных материалов проводилась на плоских образцах стали основы (09Г2С) и 3-слойного металлополимерного композита (сталь 09Г2С – резина 1Ф-1-ТМКЩ-С) типа 1, выполненных в соответствии с ГОСТ 1497-84. Образцы имели толщину и ширину рабочей части 10 и 15 мм соответственно при общей длине, равной 130 мм. Испытание проводили при комнатной температуре на универсальной испытательной машине INSTRON8801, оснащенной лазерным датчиком деформации, замеры которого обрабатывались программой Console. Разброс экспериментальных значений механических характеристик не превышал $\pm 2,5\%$. Образцы подвергались знакопеременному циклическому нагружению синусоидального типа по жесткой схеме (в режиме контроля по деформации), с частотой 1 Гц и коэффициентом асимметрии цикла $R = -1$. Количество циклов нагружения составляло $N = 100$ циклов. Для проведения циклических испытаний задавалась максимальная величина напряжения ($\sigma \leq 305$ МПа), деформация 0,2 мм и амплитуда деформации $\pm 0,5$ мкм.

3. Результаты и обсуждение

При изучении исходных полос стали 09Г2С в нормализованном состоянии было установлено, что 09Г2С имеет феррито-перлитную структуру (рис. 2) в соотношении составляющих феррит:перлит 80:20. Зерна феррита имеют относительно равноосную форму, близкую к полигональной. Средний размер зерен феррита составляет 12 мкм.

Механические свойства при комнатной температуре исходных полос стали 09Г2С после нормализации, полученные при испытаниях на одноосное растяжение, приведены в табл. 3.

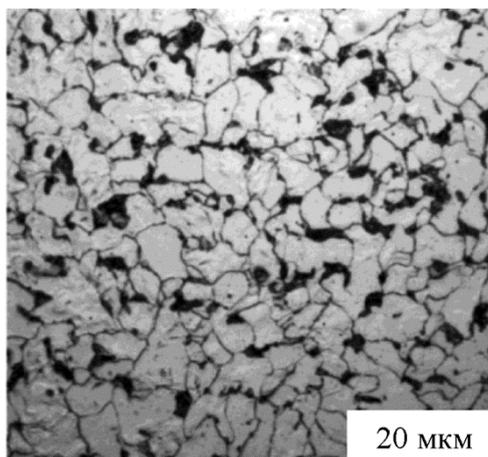


Рис. 2. Микроструктура стали 09Г2С в нормализованном состоянии

Таблица 3 – Механические свойства стали 09Г2С

Материал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
09Г2С, прокат в нормализованном состоянии толщиной 5 мм	336	465	24	67

При исследовании образцов клееного композита на основе металла и резины после ударных испытаний было установлено, что при приложении ударной нагрузки независимо от температуры испытаний наблюдается только пластический изгиб второго слоя стали 09Г2С, т. е. полного разрушения образца слоистого композита не происходит (рис. 3 а, б).

При комнатной температуре в результате ударного нагружения разрушения слоя резины и второго слоя стали 09Г2С в составе 3-слойного композита не наблюдалось (рис. 3 а). Вероятно, это связано с тем, что резина имеет свойства интенсивно поглощать энергию, приложенную к ней, тем самым предотвращая разрушение последующих слоев. Однако при этом было выявлено частичное отслоение полос стали 09Г2С. Разрушение произошло только в верхнем слое стали, что говорит о высоких ударопоглощающих свойствах резины. При понижении температуры до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ во время испытания образца композита произошло разрушение слоя 09Г2С, а также слоя резины, однако последующий слой 09Г2С не разрушился (рис. 3 б). Расслоения 3-слойного образца при пониженной температуре ударного испытания не наблюдалось.

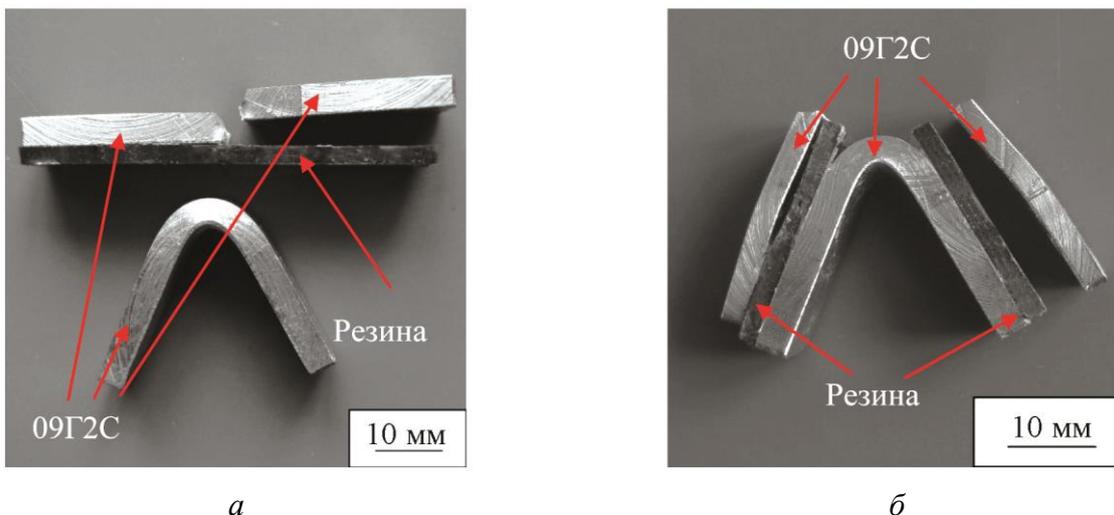


Рис. 3. Боковая поверхность изломов 3-слойного клееного композита (сталь 09Г2С и резина 1Ф-1-ТМКЦ-С) после ударных испытаний при температуре: +20 °С (а) и –60 °С (б)

Как видно из приведенных в табл. 4 результатов ударных испытаний стали основы 09Г2С и 3-слойных клееных сталерезиновых композитов, понижение температуры испытаний от комнатной до –60 °С способствует снижению значений ударной вязкости КСВ почти в 3 раза.

Таблица 4 – Результаты ударных испытаний образцов 3-слойного композита на основе стали 09Г2С и резины 1Ф-1-ТМКЦ-С с надрезом по тормозящему типу

Материал	$T_{\text{исп.}}, \text{ }^\circ\text{C}$	КСВ, МДж/м ²
09Г2С	20	0,85
	–60	0,31
3-слойный композит (сталь 09Г2С + резина 1Ф-1-ТМКЦ-С)	20	>0,83
	–60	>0,67

Примечание. Образцы 3-слойного композиционного материала полностью не разрушились, поэтому ударная вязкость обозначается как КСВ >.

Это хорошо согласуется со сменой доминирующего микромеханизма разрушения стали 09Г2С с понижением температуры испытаний от вязкого ямочного к преимущественно хрупкому разрушению по механизму квазискола (рис. 4 а, б).

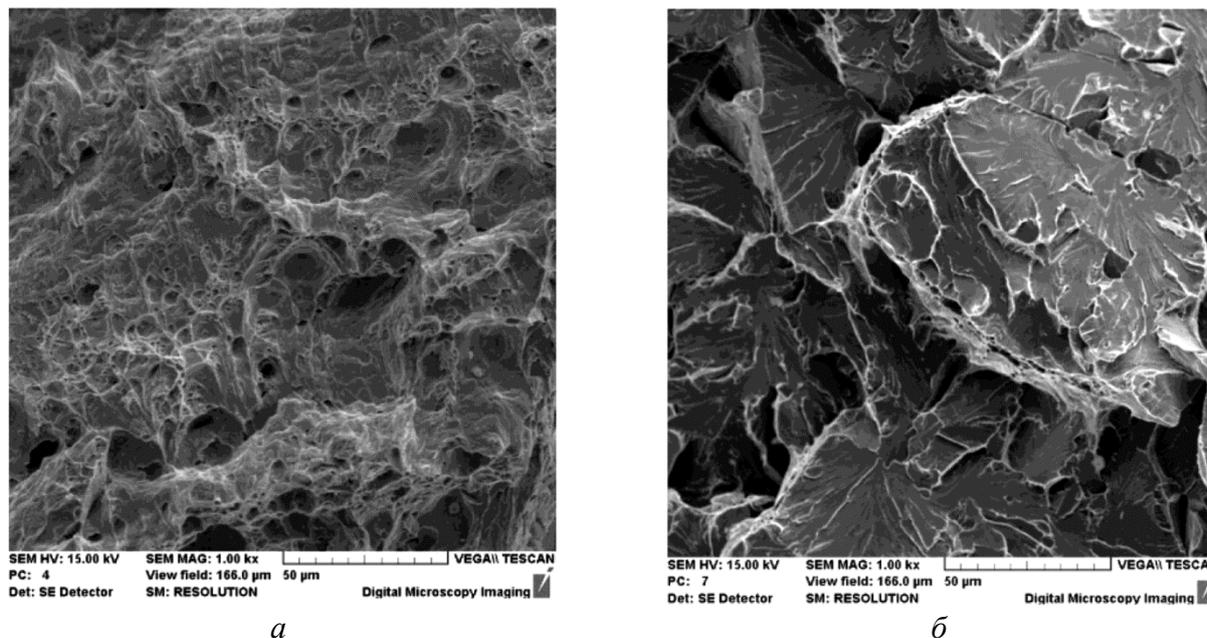


Рис. 4. Микрофрактограммы слоев 09Г2С в 3-слойном композите типа «сталь–резина» после ударных испытаний при температуре +20 °С (а) и –60 °С (б)

Испытания образцов 3-слойного композита с ориентацией надреза по тормозящему типу («crack arrester») [17] выявили незначительное различие в ударной вязкости стальных и металлополимерных образцов при комнатной температуре испытаний. Вместе с тем значения KCV 3-слойного композита при понижении температуры испытаний до –60 °С уменьшаются с 0,83 до 0,67 Дж/м² и в низкотемпературной области соответствуют более высокому уровню ударной вязкости по сравнению с монолитными стальными образцами (табл. 4). При испытаниях в условиях пониженной температуры наблюдается значительный рост ударной вязкости композиционного материала относительно исходной стали, при этом значения KCV для 3-слойного композиционного материала в 2 раза выше, чем у стали. Повышению ударной вязкости металлополимерного композита способствует реализация эффекта «вязкости расслоения» («delamination toughening») [18]. Этот эффект проявляется во всех искусственных (слоистых композитах), а также естественных композиционных материалах и связан с их слоистым строением. Кроме эффекта «вязкости расслоения» в данном композиционном материале не менее значительную роль играет и пластифицирующее влияние резиновой прослойки. Важно отметить, что в процессе ударных испытаний при температуре –60 °С произошло разрушение слоя резины в 3-слойном композите. При этом зафиксировано наибольшее значение низкотемпературной ударной вязкости KCV композита по сравнению со сталью 09Г2С. Таким образом, использование резины в многослойных слоистых композиционных материалах способствует повышению их сопротивления хрупкому разрушению в области низких климатических температурах благодаря пластифицирующей способности резины и проявлению в композите эффекта «вязкости расслоения».

После проведения циклического растяжения сжатия с нагружением по жесткому типу (с заданным размахом деформации) образцы композиционного материала сохранили свою целостность, однако наблюдались локальные отслоения резины от стали 09Г2С (рис. 5)

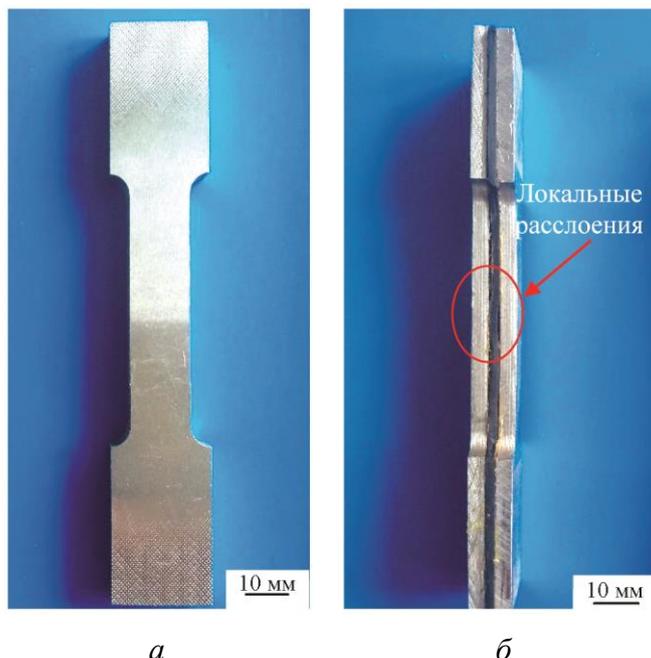


Рис. 5. Фронтальный (а) и боковой (б) вид образцов 3-слойного композита после циклического нагружения

В результате знакопеременного растяжения–сжатия была получена зависимость изменения длины образца (ΔL , мм) от приложенной силы (P , кН). Для построения петли гистерезиса приложенная сила переведена в напряжение, а изменение длины – в деформацию. После проведения преобразований были получены петли механического гистерезиса после 100 циклов растяжения, сжатия образцов из стали 09Г2С и 3-слойного клееного композита на основе стали 09Г2С с прослойками из резины 1Ф-1-ТМКЩ-С (рис. 6).

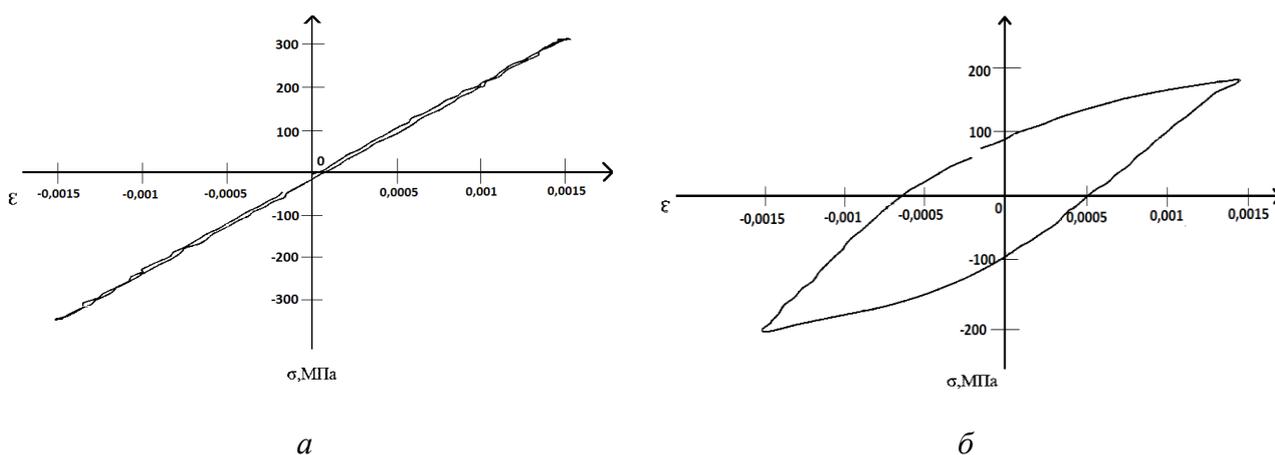


Рис. 6. Петли механического гистерезиса при знакопеременном циклическом растяжении–сжатии образцов стали 09Г2С (а) и 3-слойного композита (сталь 09Г2С–резина 1Ф-1-ТМКЩ-С) (б)

По петлям гистерезиса определено, что нагружение проходило ниже предела упругости $\sigma_{0,2}$ стали 09Г2С, однако в композиционном материале на основе данной стали присутствовала вязкая составляющая, что подтверждается расширением площади петли гистерезиса. Увеличение площади петли указывает на то, что энергия, поглощаемая композитом, определяющая его демпфирующую способность, выше, чем у исходной

стали основы. Для дальнейшей оценки демпфирующих свойств по результатам обработки массива экспериментальных данных были построены синусоиды деформации и напряжения (рис. 7). Механическая нагрузка (напряжение или деформация), как отмечено выше, прикладываются синусоидально с определенной частотой, которая описывается по закону (1) [14]:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \sin \omega t, \quad (1)$$

где σ – напряжение в момент времени t ; σ_0 – максимальное напряжение; ω – частота колебаний.

Приложенное синусоидальное напряжение имеет соответствующий ответный сигнал – деформацию, который также описывается синусоидальной функцией [14]. С учетом упругого соотношения (2):

$$\varepsilon = E \sigma_0 \sin \omega t = \varepsilon_0 \sin \omega t, \quad (2)$$

где ε – деформация в момент времени t ; ε_0 – деформация, соответствующая максимальному напряжению; ω – частота колебаний; E – модуль упругости.

При сравнении полученных синусоид деформации и нагрузки (рис. 7) определены тангенс угла механических потерь ($\operatorname{tg} \delta$), компоненты комплексного модуля упругости (модуль упругости (E'), модуль вязкости (E'')).

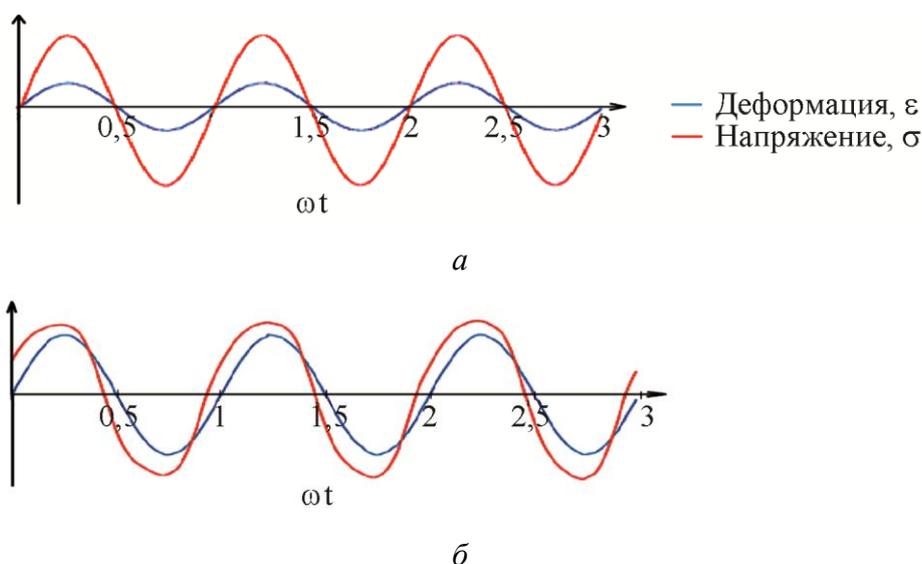


Рис. 7. Синусоиды деформации и напряжения: для стали 09Г2С (а); 3-слояного композита 09Г2С с прослойками резины 1Ф-1-ТМКЦ-С (б)

Отклик образца 3-слояного композита при механическом нагружении по деформации относительно напряжения запаздывает во времени вследствие необратимых потерь энергии. В результате этого наблюдается фазовый сдвиг δ между приложенным напряжением и деформацией. Для оценки фазового сдвига δ между приложенным напряжением и деформацией по построенным синусоидам определена разница достижения ε_0 и σ_0 по времени. Выражение для деформации имеет вид (3):

$$\varepsilon = E \sigma_0 \sin \omega t = \varepsilon_0 \sin(\omega t + \delta). \quad (3)$$

В связи с наличием фазового сдвига выражение (3) изменено и имеет вид (4):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 [\sin(\omega t)\cos\delta + \cos(\omega t)\sin\delta], \quad (4)$$

из чего следует, что деформация ε может быть представлена как сумма двух составляющих модуля вязкости и модуля упругости [14]. Из формулы (4) следуют выражения для модуля упругости (5) и модуля вязкости (6):

$$E' = (\sigma_0/\varepsilon_0) \cos\delta; \quad (5)$$

$$E'' = (\sigma_0/\varepsilon_0) \sin\delta. \quad (6)$$

Используя приведенные выше формулы с помощью программы MS Excel, был выполнен анализ полученных данных, определены значения σ_0 и ε_0 для стали 09Г2С и композита как максимумы графиков синусоид. Было установлено расстояние между ближайшими максимумами, которое соответствует углу сдвига фаз δ . Затем по формулам (5) и (6) были определены модуль вязкости E'' и модуль упругости E' .

При оценке представленных на рис. 7 данных можно сделать вывод о том, что для деформирования стали 09Г2С необходимо более высокое напряжение, чем для деформирования композиционного материала типа «сталь–резина». Данные, полученные при численной обработке, представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Основные показатели вибростойкости стали 09Г2С и 3-слойного композита (сталь 09Г2С - резина 1Ф-1-ТМКШ-С)

Материал	ε_0	σ_0 , МПа	δ , град	E' , 10^3 , МПа	E'' , 10^3 , МПа	tg δ
09Г2С	0,0015	305	0	203	0	0
Композит	0,0015	200	0,07	133	0,163	0,07

Анализируя полученные данные можно отметить, что в образцах стали 09Г2С деформация и напряжение совпадали по фазе, следовательно, материал был полностью упругим и механических потерь в этом случае не наблюдалось. При изученном режиме циклического нагружения исходная сталь 09Г2С не обладает выраженными демпфирующими свойствами. При введении прослойки из резины наблюдается повешение модуля вязкости, что подтверждает наличие демпфирующих свойств. Динамический механический анализ исходной стали показал, что напряжение, приложенное к образцу (σ_0), составило 90 % от условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$). При этом раскрытие петли механического гистерезиса не наблюдалось (рис. 6 а), что указывает на отсутствие каких-либо пластических деформаций стали 09Г2С при данном напряжении. При испытании композиционного материала напряжение составляло лишь 70 % от условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$) металла. Это свидетельствует о том, что при деформировании разрывного образца в упругой области в условиях знакопеременного растяжения–сжатия пластической деформации и соответствующего раскрытия петли механического гистерезиса быть не должно. Однако фактически наблюдалось раскрытие петли механического гистерезиса при отсутствии пластической деформации (рис. 6 б). Это говорит о том, что изученный слоистый металлополимерный материал обладает достаточно высокими демпфирующими свойствами.

4. Заключение

Испытания на ударную вязкость, проведенные при температурах +20 и –60 °С, показали, что при комнатной температуре характеристики ударной вязкости монолитной стали 09Г2С и 3-слойного композита типа «сталь–резина» имеют близкие значения ($KCV = 0,83–0,87$ МДж/м²). Однако при температуре испытаний –60 °С 3-слойный композиционный материал превосходит по величине ударной вязкости сталь 09Г2С примерно в 2 раза.

Проведенные знакопеременные циклические испытания по схеме растяжение–сжатие 3-слойного композита выявили на кривых циклического нагружения 3-слойного композита наличие разомкнутой петли механического гистерезиса, свидетельствующей о высокой демпфирующей способности данного материала. Применение резины в многослойных металлополимерных композитах, полученных методом холодного склеивания, позволяет придавать им повышенные демпфирующие свойства, оцениваемые с помощью комплекса таких показателей вибростойкости, как тангенс угла механических потерь ($tg\delta$), модуль упругости (E') и модуль вязкости (E'').

Благодарность

Авторы выражают благодарность сотруднику ИМАШ УрО РАН В.Г. Старкову за помощь в получении образцов композиционных материалов.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 и при поддержке проекта УрО РАН № 18-9-1-20 (программа «Арктика»).

Литература

1. Формирование комплекса механических свойств и характеристик сопротивления разрушению сэндвич-композитов на основе стали 09Г2С и высокопрочной стали ЭП678 различной дисперсности / С. В. Гладковский, С. В. Кутенева, И. С. Каманцев, Р. М. Галеев, Д. А. Двойников // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2017. – Iss. 6. – P. 71–90. – DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.071-090.
2. Layered Metal Composites with High Resistance to Brittle Fracture at Low Temperatures / S. V. Gladkovskii, I. S. Kamantsev, S. V. Kuteneva, D. A. Dvoynikov, A. V. Kuznetsov // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 2053. – 020003. – DOI: 10.1063/1.5084349.
3. Gladkovsky S. V., Kuteneva S. V., Sergeev S. N. Microstructure and mechanical properties of sandwich copper/steel composites produced by explosive welding // *Materials Characterization*. – 2019. – Vol. 154. – P. 294–303. – DOI: 10.1016/j.matchar.2019.06.008.
4. Chawla K. N. *Composite Materials Science and Engineering*. – 4th ed. / Department of Materials Science and Engineering, USA. – Birmingham : The University of Alabama at Birmingham, 2019. – 557 p. – DOI: 10.1007/978-3-030-28983-6.
5. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологии их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 1 (34). – С. 3–33. – DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. Confirmation of the healing mechanism in a mendable EМАА-epoxy resin / S. Meure, R. J. Varley, Dong Yang Wu, S. Mayo, K. Nairn, S. Furman // *European Polymer Journal*. – 2012. – Vol. 48. – P. 524–531. – DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2011.11.021.
7. Chernikov S. A. Expansion of the suppression band of a vibroprotective system by a feedback dynamic damper // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2015. – Vol. 44, no. 5. – P. 439–444. – DOI: 10.3103/S1052618815050052.

8. Пономарев Ю. К., Уланов А. М. Сравнение Российских и зарубежных виброизоляторов из проволочных демпфирующих материалов. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – № 3. – С. 214–218.
9. Типалин С. А., Сапрыткин Б. Ю., Шпунькин Н. Ф. Краткий обзор многослойных листовых деформируемых материалов, используемых для защиты от шума // Известия МГТУ «МАМИ». – 2012. – Т. 2, № 2 (14). – С. 194–199.
10. Колодкин М. Н., Зайцев А. А. Перспективные конструкции пути в метрополитене. // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 40–41. – С. 74–76.
11. Вербилов А. Ф., Ковалёв В. В., Ульрих С. А. Нелинейные колебательные процессы в динамике гусеничного движителя с резинометаллическими шарнирными соединениями // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – № 6. – С. 243–247.
12. Подготовка поверхности алюминиевого сплава В-1469 перед применением в составе слоистого гибридного материала / В. В. Антипов, Д. В. Чесноков, И. А. Козлов, И. А. Волков, А. П. Петрова // Труды ВИАМ. – 2018. – № 64. – С. 59–65. – DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-59-65.
13. Влияние состава вибропоглощающих материалов на коэффициент механических потерь / В. А. Сагомонова, В. И. Кислякова, Т. Ю. Тюменева, В. А. Большаков // Труды ВИАМ. – 2015. – № 10. – С. 63–69. – DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-10-10.
14. Новые вибропоглощающие материалы / Ю. В. Сытый, В. А. Сагомонова, В. И. Кислякова, В. А. Большаков // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 2. – С. 51–54.
15. Пономарев Ю. К., Уланов А. М. Сравнение Российских и зарубежных виброизоляторов из проволочных демпфирующих материалов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – № 3. – С. 214–218.
16. Черкасов В. Д., Соломатов В. И., Фомин Н. Е. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. Вибропоглощающие композиционные материалы. – Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2001. – 95 с.
17. Embury J. D., Petch N. J, Wright E. S. Fracture of mild steel laminates // Transactions of the Society of Mining Engineers of AIME. – 1967. – Vol. 239 (1). – P. 114–18.
18. Fracture Behavior and Delamination Toughening of Molybdenum in Charpy Impact Tests / K. Babinsky, S. Primig, W. Knabl, A. Lorich, R. Stickler, H. Clemens // Journal of the Minerals Metals & Materials Society. – 2016. – Vol. 68, iss. 11. – P. 2854–2863. – DOI: 10.1007/s11837-016-2075-y.

Received: 04.12.2019

Revised: 18.02.2020

Accepted: 06.03.2020

DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.019-025

INCREASING LOAD-CARRYING ABILITY OF GEAR COUPLINGS

G. N. Makarov¹, V. V. Grib^{2, a)} and M. G. Shalygin^{3, b)}*

¹*Nokia Solutions and Networks JSC, Bryansk, Russian Federation*

²*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
64 Leningradskiy Ave., 125319, Moscow, Russian Federation*

³*Bryansk State Technical University, 7, 50-letiya Oktyabrya Blvd, 241035, Bryansk, Russian Federation*

^{a)}  <http://orcid.org/0000-0002-4252-2849>;

^{b)}  <http://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

*Corresponding author. E-mail: migshalygin@yandex.ru

Address for correspondence: Bryansk State Technical University, 7 50-letiya Oktyabrya Blvd, 241035, Bryansk, Russia
Tel.: +7 903 868 85 68

A method for increasing the load-carrying capacity of gear couplings by reducing maximum contact stresses is considered. The method is based on the use in the design of a gear box coupling, the teeth of which have three annular grooves made along a closed helix. This design allows you to give the teeth an elastic damping properties necessary to compensate for the uneven distribution of the load across the width of the tooth, due to the peculiarities of the operation of gear couplings. A solution to the problem of the elastic contact of two teeth of a gear coupling is given using the SolidWorks simulation finite element analysis software system. It has been established that the separation of the teeth of the gear cage by annular grooves makes it possible to reduce the magnitude of the contact stresses by 13.1–15.4 %, and this indicates the feasibility of using the design proposed by the authors in gear couplings.

Keywords: load-carrying ability, contact pressure, gear coupling.

References

1. Popov A.P., Savenkov O.I. Experimental research of the load-carrying ability of gear couplings. *Vestnik Inzhenernoy Akademii Ukrainy*, 2010, nos. 3–4, pp. 203–209. (In Russian).
2. Popov A.P., Savenkov O.I. Contact strength of gear couplings with longitudinal teeth modification. *MOTROL*, 2013, vol. 13A, pp. 167–176. (In Russian).
3. Popov A.P., Mironenko A.I., Savenkov O.I. Contact stiffness of gear transmissions in view of the effect of tooth misalignment. *Vestnik Natsionalnogo Tekhnicheskogo Universiteta "Kharkovskiy Politekhnicheskiy Institut"*. Seriya: Problemy Mekhanicheskogo Privoda. – 2016. – No. 23 (1195). – P. 121–125. (In Russian).
4. Borodin A.V. Taruta D.V., Velgodskaya T.V. Increase bearing ability of tooth gearing of a traction reducer of the locomotive. *Izvestiya Transsiba*, 2010, № 3 (3). – P. 7–12. (In Russian).
5. Gorlenko O.A. Makarov G.N. Increase of wear resistance of spur gears. *Izvestiya Moskovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2014, vol. 2, no. 2 (20), pp. 21–25. (In Russian).
6. Gorlenko O.A., Makarov G.N., and Shnyrikov I.O. Improving the contact endurance of the teeth of spur cylindrical gears. *Trenie Smazka Mash. Mekh.*, 2014, no. 6, pp. 25–27. (In Russian).
7. Malinkovich M.D. Study of the process of cylindrical gears engagement. *Bull BSTU*, 2008, iss. 3 (19), pp. 32–37. (In Russian).
8. Gorlenko O.A., Shalygin M.G., Makarov G.N. Removing contact of edge of teeth of planetary transmissions. *Stroitelnye i Dorozhnye Mashiny*, 2017, no. 8, pp. 38–42. (In Russian).

9. Gorlenko O.A., Shalygin M.G., Makarov G.N. Eliminating Liquid Entrapment between the Teeth of a Gear-Driven Pump. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 7, pp. 499–502. DOI: 10.3103/S1068798X18070079.

Подана в журнал: 04.12.2019

УДК 621.825.56

DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.019-025

ПОВЫШЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ЗУБЧАТЫХ МУФТ

Г. Н. Макаров¹, В. В. Гриб^{2, а)}, М. Г. Шалыгин^{3, б)}*

¹АО «Нокиа Солюшинз энд Нетворкс», г. Брянск, Российская Федерация

²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Российская Федерация

³Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация

^{а)}  <http://orcid.org/0000-0002-4252-2849>;

^{б)}  <http://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

* Ответственный автор. Электронная почта: migshalygin@yandex.ru

Адрес для переписки: Брянский государственный технический университет, 241035, Россия, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7; Тел.: +7–903–868–85–68

Рассмотрен способ повышения нагрузочной способности зубчатых муфт, путем уменьшения величины максимальных контактных напряжений. Способ основан на применении в конструкции муфты зубчатой обоймы, зубья которой имеют три кольцевые канавки, выполненные по замкнутой винтовой линии. Такая конструкция позволяет наделить зубья упругодемпфирующими свойствами, необходимыми для компенсации неравномерного распределения нагрузки по ширине зуба, обусловленного особенностями работы зубчатых муфт. Дано решение задачи упругого контакта двух зубьев зубчатой муфты помощью программной системы конечно-элементного анализа SOLIDWORKS simulation. Установлено, что разделение зубьев зубчатой обоймы кольцевыми канавками позволяет уменьшить величину контактных напряжений на 13,1–15,4 %, что свидетельствует о целесообразности применения предложенной авторами конструкции в зубчатых муфтах.

Ключевые слова: нагрузочная способность, контактное давление, зубчатая муфта.

1. Введение

На современном этапе развития промышленности зубчатые муфты получают все большее распространение. Они применяются в различных механизмах и машинах и представляют собой зубчатые механизмы с передаточным отношением равным единице, являющиеся ответственными узлами, часто определяющими надежность и долговечность всей машины. Сдерживающими факторами более широкого применения зубчатых муфт является ограничение по нагрузочной способности при повышенных углах перекоса соединяемых валов.

При работе зубчатых муфт, вследствие перекоса осей соединяемых валов, происходят относительные угловые и тангенциальные смещения зубьев зубчатой втулки относительно зубчатой обоймы, величина которых возрастает по мере износа сопряжений соединяемых агрегатов [3]. Это приводит к уменьшению величины фактической площадки контакта и ее смещению к кромке зубьев, что является причиной возрастания максимальных контактных напряжений в зацепление [1, 2].

В работах [4–8] предлагается конструкция зубчатого колеса, позволяющая повысить нагрузочную способность зубчатой передачи за счет надления зубьев дополнительной изгибной податливостью, тем самым венец зубчатого колеса получает дополнительную степень свободы, что ведет к ослаблению кромочного взаимодействия зубьев. Для того чтобы изготовить данное зубчатое колесо необходимо разрезать зубья кольцевыми канавками, выполненными по замкнутой винтовой линии, расположенными в плоскостях, параллельных плос-

костям движения колеса [8, 9]. Применение в зубчатых муфтах обойм с зубьями, разделенными на части, позволит повысить число зубьев, одновременно находящихся в работе, и приведет к выравниванию нагрузки по ширине контактирующих зубьев (рис. 1). При этом каждая часть зуба будет работать как отдельное зацепление и приспособляться к изменяющимся условиям работы [6, 7].

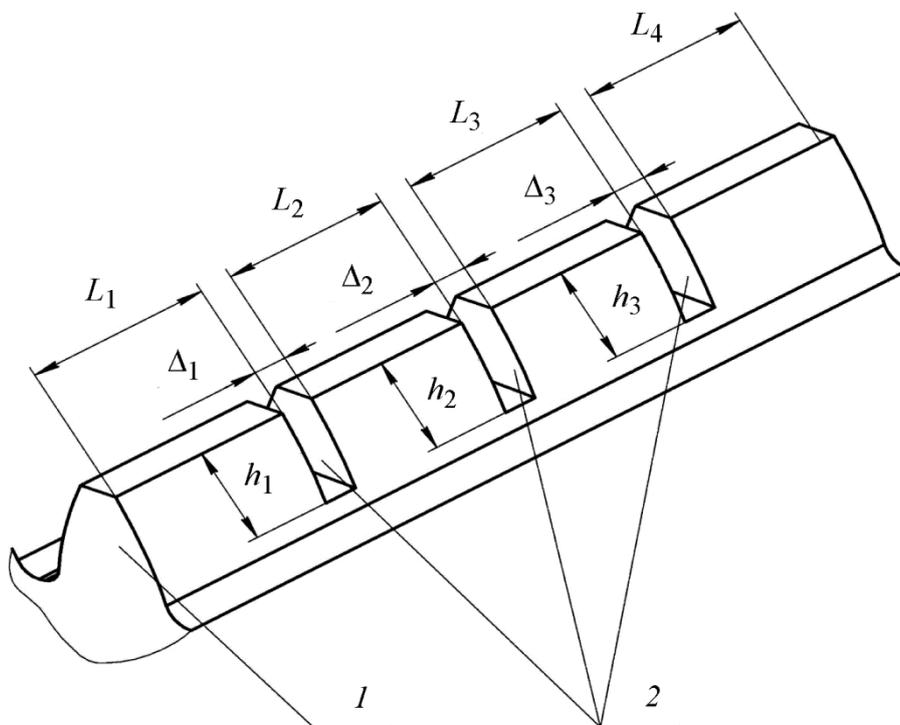


Рис. 1. Зуб зубчатой обоймы с кольцевыми канавками: 1 – венец зубчатого колеса; 2 – кольцевые канавки; $L_1 = L_2 = L_3 = L_4$ – размеры участков; $h_1 = h_2 = h_3$ $h_4 = 1,5 m$ – глубина кольцевых канавок (здесь m – модуль зубчатого колеса); $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 1$ мм – ширина кольцевых канавок

Однако в литературных источниках отсутствуют данные о влиянии кольцевых канавок в зубьях зубчатой обоймы на нагрузочную способность зубчатых муфт. Поэтому оценка влияния кольцевых канавок в зубчатой обойме на нагрузочную способность муфты является актуальной задачей.

Разработка и создание высоконагруженных зубчатых муфт, предназначенных для эксплуатации в условиях перекоса осей соединяемых валов агрегатов, является актуальной проблемой. Эта проблема является неразрывной составной частью существующих в настоящее время научных программ и заданий практически во всех отраслях машиностроения, выпускающих зубчатые муфты. Для успешного решения указанной проблемы необходимо проводить анализ новых технических решений, направленных на повышение нагрузочной способности зубчатых муфт.

Поэтому авторами была решена задача определения величины максимальных контактных давлений для сопряжений «зуб зубчатой втулки – зуб зубчатой обоймы» и «зуб зубчатой втулки – зуб зубчатой обоймы с кольцевыми канавками».

2. Материалы и методика

В качестве объекта исследования рассматривается судовая зубчатая муфта, для которой в работе [2] определены параметры муфты (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры зацепления зубьев судовой зубчатой муфты

Параметр	Величина
Модуль, мм	6
Число зубьев	40
Угол профиля исходного контура, град.	20
Ширина зубьев зубчатой втулки, мм	45
Ширина зубьев зубчатой обоймы, мм	50
Радиус бочкообразности, мм	3000
Материал	Сталь 18ХНВА ГОСТ 4543-71
Модуль упругости, МПа	$2,1 \times 10^5$
Коэффициент Пуассона	0,28

Предметом исследования является величина максимальных контактных напряжений в контакте двух зубьев. В качестве метода исследований применялся метод конечно-элементного (КЭ) моделирования с помощью программной системы конечно-элементного анализа SOLIDWORKS simulation.

Геометрическая модель зуба представляет собой зуб эвольвентного профиля на массивном основании. В модели зацепления рабочие поверхности зубьев вводятся в контакт, а поверхности основания используются для задания граничных условий. Для построения геометрической модели зуба использовался инструмент КОМПАС shaft-3D. Структура КЭ сетки для зуба зубчатой обоймы с кольцевыми канавками представлена на рис. 2. Сгущение сетки создавалось в области, «накрывающей» пятно контакта, чтобы обеспечить более точное вычисление контактных давлений.

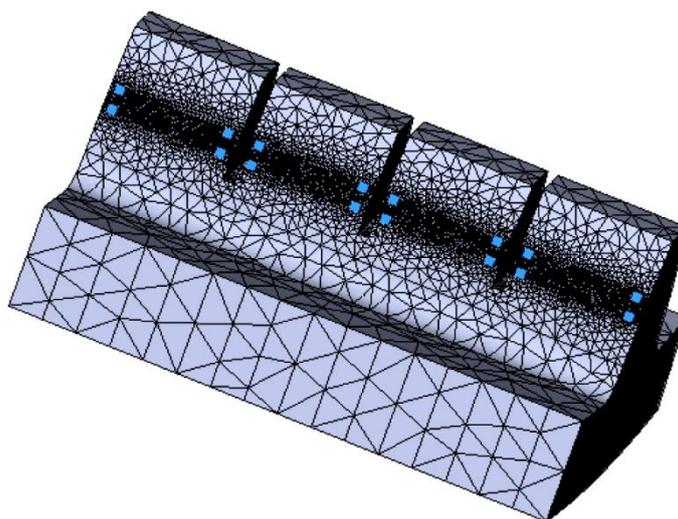


Рис. 2. Конечно-элементная модель зуба обоймы с кольцевыми канавками

Граничные условия задавались в узлах сетки, лежащих на контурах поверхности оснований. Узлы зубчатой обоймы закреплялись по трем линейным степеням свободы. Для линейных перемещений узлов зубчатой втулки уравнения связи задавались так, чтобы у них оставалась вращательная степень свободы относительно оси втулки. Нагрузка прикладывалась к узлам зубчатой втулки равномерно, чтобы обеспечить момент, приложенный ко втулке.

3. Результаты и обсуждения

При изготовлении зубчатых муфт их зубьям присущи накопленные погрешности окружных шагов, которые приводят к неравномерному распределению усилий между зубьями, величины указанных погрешностей определяются точностью изготовления зубьев. Указанная неравномерность носит постоянный характер и не изменяется при вращении зубчатой муфты. В связи с этим усилие, действующее на максимально нагруженную пару зубьев вследствие ошибок при их изготовлении, складывается поочередно с усилиями, действующими на каждую сопряженную пару зубьев при перекосах осей. Неточность изготовления зубьев, оказывает отрицательное влияние на нагрузочную способность зубчатых муфт, значительно уменьшая ее. Поэтому при расчетах необходимо учитывать, что зубья зубчатой втулки и зубчатой обоймы входят в контакт под некоторым углом перекоса.

Для оценки влияния кольцевых канавок в зубьях обоймы зубчатой муфты на величину контактных напряжений в зацеплении рассматривались следующие варианты сопряжений зубьев:

- зуб зубчатой втулки – зуб зубчатой обоймы без модификации;
- зуб зубчатой втулки – зуб зубчатой обоймы с кольцевыми канавками.

Для каждого варианта сопряжений суммарный угол перекоса осей принимался равным $\psi = 8,7 \cdot 10^{-3}$ рад. [2], нагружение осуществлялось вращающими моментами 100, 200 и 300 Н·м. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

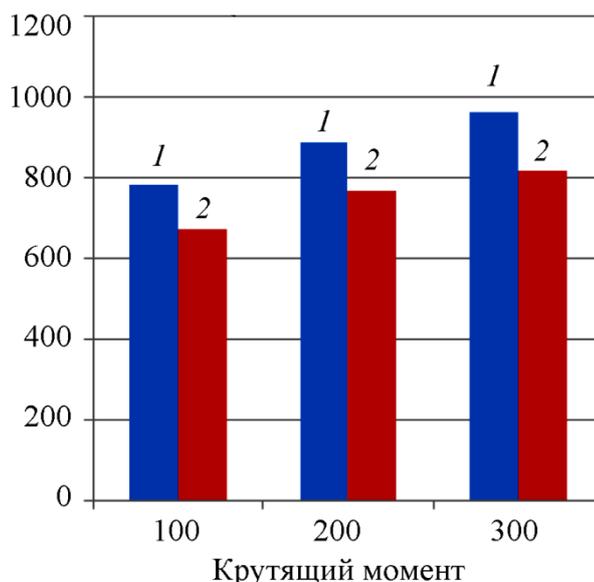


Рис. 3. Величина контактных напряжений, МПа: 1 – зуб зубчатой втулки – зуб зубчатой обоймы без модификации; 2 – зуб зубчатой втулки – зуб зубчатой обоймы с кольцевыми канавками

Таблица 2 – Результаты расчета

Крутящий момент	Величина контактных напряжений, МПа	
	Зуб зубчатой втулки – зуб зубчатой обоймы	
	без модификации	с кольцевыми канавками
100	785,2	674,3
200	886,4	766,9
300	965,6	816,7

Таким образом, разделение зубьев зубчатой втулки кольцевыми канавками позволяет снизить величину контактных напряжений на 13,1–15,4 % при наличии угла перекоса обоймы относительно втулки, что свидетельствует о возможности повышения нагрузочной способности зубчатых муфт, что может быть особенно актуально в реальных условиях эксплуатации при значительных внешних динамических воздействиях.

4. Заключение

В статье рассмотрена конструкция зубчатой муфты, не имеющая аналогов в современном машиностроении. Отличительной особенностью конструкции является наличие кольцевых канавок, выполненных по замкнутой винтовой линии, в зубья зубчатой обоймы муфты, что позволило уменьшить величину контактных напряжений на 13,1–15,4 % при наличии угла перекоса обоймы относительно втулки, в среднем на 120 МПа. Доказана целесообразность применения данной конструкции с целью повышения нагрузочной способности муфты.

Литература

1. Попов А. П., Савенков О. И. Экспериментальное исследование нагрузочной способности зубчатых муфт // Вестник Инженерной академии Украины. – 2010. – № 3–4. – С. 203–209.
2. Попов А., Савенков О. Контактная прочность зубчатых муфт с продольно модифицированными зубьями // MOTROL. – 2013. – Vol. 13A. – С. 167–176.
3. Попов А. П., Мироненко А. И., Савенков О. И. Контактная жесткость зубчатых передач с учетом влияния перекосов зубьев // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия: Проблемы механического привода. – 2016. – № 23 (1195). – С. 121–125.
4. Бородин А. В., Тарута Д. В., Вельгодская Т. В. Повышение несущей способности зубчатой передачи тягового редуктора тепловоза // Известия Транссиба. – 2010. – № 3 (3). – С. 7–12.
5. Горленко О. А., Макаров Г. Н. Повышение износостойкости прямозубых цилиндрических зубчатых передач // Известия Московского государственного технического университета. – 2014. – Т. 2, № 2 (20). – С. 21–25.
6. Макаров Г. Н., Шныриков И. О., Горленко О. А. Повышение контактной выносливости зубьев прямозубых цилиндрических зубчатых передач // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 6. – С. 25–27.
7. Малинкович М. Д. Исследование процесса зацепления цилиндрических зубчатых передач // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2008. – Вып. 3. – С. 32–37.
8. Горленко О. А., Шалыгин М. Г., Макаров Г. Н. Устранение кромочного контакта зубчатых колес планетарных передач // Строительные и дорожные машины. – 2017. – № 8. – С. 38–42.
9. Gorlenko O. A., Shalygin M. G., Makarov G. N. Eliminating Liquid Entrapment between the Teeth of a Gear-Driven Pump // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, no. 7. – P. 499–502. – DOI: 10.3103/S1068798X18070079.

Received: 03.10.2019

Revised: 25.02.2020

Accepted: 06.03.2020

DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.026-037

FRACTOGRAPHIC STUDY OF THE ARMOR STEEL OF SELF-PROPELLED ARTILLERY GUNS OF THE RED ARMY

B. A. Gizhevskii^{1, a)*}, M. V. Degtyarev^{1, b)}, T. I. Chashchukhina^{1, c)},
L. M. Voronova^{1, d)}, E. I. Patrakov^{1, e)}, N. N. Melnikov^{2, f)}, Vas. V. Zapariy^{2, g)},
S. V. Ruzaev^{3, h)}, Vl. V. Zapariy^{4, i)}

¹*M.N. Miheev Institute of Metal Physic, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 18 S. Kovalevskoi St., Ekaterinburg, 620108, Russian Federation*

²*Institute of History and Archeology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 16 S. Kovalevskoi St., Ekaterinburg, 620990, Russian Federation*

³*Museum Complex Private Cultural Institution,*

² *A. Kozitsina St., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Sverdlovsk Region, Russian Federation*

⁴*B.N. Yeltsin Ural Federal University,*

¹⁹ *Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation*

- a)  <https://orcid.org/0000-0002-3549-3066>  gizhevskii@imp.uran.ru;
- b)  <https://orcid.org/0000-0001-8482-4928>  highpress@imp.uran.ru;
- c)  <https://orcid.org/0000-0002-7056-6937>  highpress@imp.uran.ru;
- d)  <https://orcid.org/0000-0002-0853-8126>  highpress@imp.uran.ru;
- e)  <https://orcid.org/0000-0003-2793-9248>  patrakov@imp.uran.ru;
- f)  <https://orcid.org/0000-0003-1406-2993>  meln2011@gmail.com;
- g)  pantera.zap@gmail.com;
- h)  S.Ruzaev@elem.ru;
- i)  <https://orcid.org/0000-0002-0853-8126>  vvzap@mail.ru

*Corresponding author. E-mail: gizhevskii@imp.uran.ru

Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoi, 18, Ekaterinburg, 620108, Russian Federation

Tel.: +7 (343) 374 35 64; fax: +7 (343) 374 52 44

The article presents a study of the fractures of steels which were used to make armor elements of SU-85 and SU-100 self-propelled artillery guns produced at Uralmash (UZTM) in 1943–1945 and are on display at the Museum of military equipment of the Ural Mining and Metallurgical Company (Verkhnyaya Pyshma, Sverdlovsk Region). In all the investigated samples of armored steel, an increased content of sulfur and phosphorus was found. It is shown that the fracture obtained at room temperature has a predominantly ductile transcrystalline character. The observed cleavage facets are associated with sulfide precipitates. The presence of oxide particles is not accompanied by local brittle fracture of the steel. Testing of the steel cooled in liquid nitrogen shows a decrease in the share of the ductile component in the fracture, but it does not lead to transcrystalline fracture.

Keywords: armored steel, fracture surface, transcrystalline fracture, sulfides.

Acknowledgment

The work was performed under the programs Spin, No. AAAA-A18-118020290104-2 and Pressure, No. AAAA-A18-118020190104-3. The historical part of the study was made by Vas. V. Zapariy and N. N. Melnikov in the framework of the IIAA basic budget financing topic “Russia in the Regional Dimension of the Economic, Political, and Sociocultural Modifications of the Modern Time”.

References

1. Melnikov N.N., Gizhevsky B.A., Zapary Vas. V., Zapary Vlad. V. The history of creating cannon-proof 8S armor. *Chernye Metally*, 2019, no. 5, pp. 70–76. (In Russian).
2. Ustyantsev S.V., Kolmakov D.G. *Boevye mashiny Uralvagonzavoda. Tank T-34* [Combat Vehicles of the Uralvagonzavod. Tank T-34]. Nizhniy Tagil, Media-Print Izdatelskiy Dom Publ., 2005, 232 p. (In Russian).
3. Vysokovsky S.I., Guglin N.N., Levin L.S., Maresev M.I., Filorikyan B.K. Ways of increasing the ballistic resistance of rolled steel armor for tanks. *Voprosy Oboronnoy Tekhniki*. Series XX, 1976, no. 63. (In Russian).
4. Guderian G. *Vospominaniya soldata* [Guderian H. Erinnerungen eines Soldaten. Heidelberg, 1951]. Moscow, Voenizdat Publ., 1954, 140 p. (In Russian).
5. Sadovsky V.D., Goppe N.P. Austenite transformations in chromium-nickel steel. *Uralskaya Metallurgiya*, 1937, no. 3, pp. 43–48. (In Russian).
6. Zyuzin V.I., Sadovskii V.D., and Baranchuk S.I. Effect of alloying elements on the position of the martensitic point, amount of retained austenite, and its stability upon tempering. *Metallurg*, 1939, nos. 10–11, pp. 75–80. (In Russian).
7. Bain E.C. *Functions of the Alloying Elements in Steel*, Cleveland, Amer Soc. Met., 1939, 312 p.
8. Goodremon E. *Spetsialnyye stali*, t. 1 [Von Eduard Houdremont. *Handbuch der Sonderstahlkunde*, Unter Mitarbeit von H.-J. Wiester, 3. verbesserte Aufl. I. Bd. Berlin, Springer-Verl., Düsseldorf, Stahleisen, 1956]. German. transl., ed. A.S. Zaimovsky and M.L. Bernstein, Moscow, State scientific and technical publishing house of literature on ferrous and non-ferrous metallurgy, 1959, 952 p. (In Russian).
9. Zav'yalov A.S. *K Teorii Legirovaniya i Term. Obrab. Stali* [Theory on Alloying and Heat Treatment of Steel]. Moscow, TsNIIKTP Press, 1943. (In Russian).
10. Schastlivtsev V.M., Kut'in A.B., and Smirnov M.A. *Ispravlenie struktury i izlomov peregretoi konstruktsionnoi stali* [Structural Distortion and Fractures of Super-heated Structural Steel]. Yekaterinburg, UrO RAN, 2003. (In Russian).
11. Saraev Yu.N., Gladkovsky S.V., Lepikhin S.V., Dvoynikov D.A., Kamantsev I.S., Veselova V.E. Influence of welding technology on the structure, mechanical properties and fracture toughness of 09G2S steel welded joints. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, iss. 5, pp. 23–42. Available at : http://dream-journal.org/DREAM_Issue_5_2017_Saraev_Yu.N._et_al._023_042.pdf
12. Gladkovsky S.V., Kuteneva S.V., Kamantsev I.S., Galeev R.M., Dvoynikov D.A. Formation of the mechanical properties and fracture resistance characteristics of sandwich composites based on the 09G2S steel and the EP678 high-strength steel of various dispersion. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, iss. 6, pp. 71–90. Available at: http://dream-journal.org/DREAM_Issue_6_2017_Gladkovsky_S.V._et_al._071_090.pdf
13. Levit V.I., Smirnov S.V., Bogatov A.A., Kolmogorov V.L., Davydova L.S., Patrakov E.I., Shalimova A.V. Estimating the damageability of a deformed metal. *Phys. Met. Metall.*, 1982, vol. 54, no. 4, pp. 149–155.
14. Crouch I.G., Cimpoeru S.J., Li H., Shanmugam D. Armour steels. In: *The Science of Armour Materials*, ed. by I.G. Crouch, Series “Woodhead Publishing in Materials”, Woodhead Publishing, 2017, pp. 55–115.
15. Sadovskii V.D., Kutiin A.B., Gerbikh N.M. Transcrystalline embrittlement of hardened steel due to step-cooling in austenite region. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1989, vol. 305, no. 3, pp. 611–613. (In Russian).
16. Vorob'ev N.I., Mirzaev D.A., Tokovoi O.K., Fominykh E.A., Yakovleva I.L. Sulfides in forgings of 40KhGM structural steel. *Russian metallurgy (Metally)*, 2006, vol. 2006, no. 2, pp. 119–125. DOI: 10.1134/S0036029506020030.

Подана в журнал: 03.10.2020

УДК 620.178

DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.026-037

ФРАКТОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БРОНЕВОЙ СТАЛИ САМОХОДНЫХ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ УСТАНОВОК КРАСНОЙ АРМИИ

Б. А. Гижевский^{1, а)*}, М. В. Дегтярев^{1, б)}, Т. И. Чашухина^{1, в)},
Л. М. Воронова^{1, г)}, Е. И. Патраков^{1, д)}, Н. Н. Мельников^{2, е)}, Вас. В. Запарий^{2, ж)},
С. В. Рузаев^{3, з)}, Вл. В. Запарий^{4, и)}

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Российская Федерация

²Институт истории и археологии Уральского отделения Российской академии наук,
ул. С. Ковалевской, 16, г. Екатеринбург, 620990, Российская Федерация

³Частное учреждение культуры «Музейный комплекс»,
ул. А. Козицина, 2, г. Верхняя Пышма, Свердловская область, 624091, Российская Федерация

⁴Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

а)  <https://orcid.org/0000-0002-3549-3066>  gizhevskii@imp.uran.ru;

б)  <https://orcid.org/0000-0001-8482-4928>  highpress@imp.uran.ru;

в)  <https://orcid.org/0000-0002-7056-6937>  highpress@imp.uran.ru;

г)  <https://orcid.org/0000-0002-0853-8126>  highpress@imp.uran.ru;

д)  <https://orcid.org/0000-0003-2793-9248>  patrakov@imp.uran.ru;

е)  <https://orcid.org/0000-0003-1406-2993>  meln2011@gmail.com;

ж)  pantera.zap@gmail.com;

з)  S.Ruzaev@elem.ru;

и)  <https://orcid.org/0000-0002-0853-8126>  vvzap@mail.ru

* Ответственный автор. Электронная почта: gizhevskii@imp.uran.ru

Адрес для переписки: ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Российская Федерация
Тел.: +7(343)378–35–64; факс: +7(343)374–52–44

Проведено исследование изломов сталей, из которых были изготовлены элементы бронирования самоходных артиллерийских установок СУ-85 и СУ-100, произведенных на Уралмаше (УЗТМ) в 1943–1945 гг. и находящихся в экспозиции Музея военной техники Уральской горно-металлургической компании (г. Верхняя Пышма Свердловской области). Во всех исследованных образцах броневой стали обнаружено повышенное содержание серы и фосфора. Излом, полученный при комнатной температуре, имеет преимущественно вязкий транскристаллитный характер. Наблюдающиеся фасетки скола связаны с выделениями сульфидов. Присутствие оксидных частиц не сопровождается локальным хрупким разрушением стали. Испытание стали, охлажденной в жидком азоте, показало снижение доли вязкой составляющей в изломе, но не привело к межзеренному разрушению.

Ключевые слова: броневая сталь, поверхность разрушения, транскристаллитный излом, сульфиды.

1. Введение

Броневая защита – одна из главных составляющих, определяющих живучесть танка на поле боя. Первоначально танковая броня предназначалась для защиты от пуль и мелких осколков. Для этой цели использовались сравнительно тонкие (толщиной 10–30 мм) листы броневой стали, подвергнутой термообработке. Типичным представителем этого класса бро-

ни в Советском Союзе была гомогенная сталь ИЗ, разработанная на Ижорском заводе. Она стала в СССР первой по-настоящему серийной танковой броней и использовалась для всех танков вплоть до конца 1930-х гг., когда в связи с развитием противотанковой артиллерии встал вопрос о создании противоснарядной танковой брони. К концу 1930-х годов отечественные танкостроители разработали новую линейку танков, которые должны были получить совершенно иную систему бронезащиты. В течение 1940 г. на Мариупольском заводе была

в целом создана технология производства противоснарядной танковой брони 8С высокой твердости (до НВ 444). Броня 8С являлась основой бронезащиты самого массового советского танка II Мировой войны Т-34 и самоходных артиллерийских установок на его основе.

Для литых деталей (башня, маска орудия) более поздних моделей использовалась сталь с повышенным содержанием хрома. Краткий очерк создания и развития технологии брони 8С содержится в работе [1]. Советским металлургам удалось создать экономно легированную броневую сталь, относительно дешевую, но при этом обеспечивающую проектный уровень защиты. [2]. Наряду с достоинствами стали 8С были присущи недостатки, например склонность к хрупкому разрушению вследствие закалочных и сварочных внутренних напряжений [3]. Тем не менее, по отзыву Г. Гудериана в 1941 г. германская броня уступала по качеству «легированной стали русских» [4].

Одно из основных требований к новой броне заключалось в достижении такого сочетания твердости и пластичности, чтобы она выдерживала обстрел и при попадании снаряда без сквозного пробития не давала расслоений и отколов, способных поражать экипаж. Кроме того, противоснарядная танковая броня должна быть сравнительно недорогой и технологичной в производстве и обработке, в том числе при сварке. Необходимые свойства брони 8С обеспечивались выбором оптимального состава и соответствующего режима термообработки. К концу 30-х гг. XX в. в трудах отечественных и зарубежных ученых были в основном исследованы превращения, происходящие в сталях при охлаждении и нагреве, и влияние легирующих элементов на эти превращения [5–9] и, таким образом, была заложена научная основа создания надежной брони. Качество броневых плит оценивалось на заводе-изготовителе по результатам определения твердости и по излому взятых от них образцов; присутствие в аморфном изломе ясно выраженных кристаллических пятен вызывало браковку. Кроме того, некоторые плиты подвергались испытанию на полигоне.

Изучение вида излома металлов является, наряду с измерением твердости, наиболее старым методом оценки качества стали. По виду излома судят о качестве слитка, пластической деформации и термической обработки. В настоящее время считается, что вид излома – единственный параметр, хорошо связанный с уровнем ударной вязкости [10]. Поэтому он служит браковочной характеристикой при испытаниях. По виду излома можно не только судить о склонности стали к хрупкому разрушению, но и в ряде случаев определить причину охрупчивания. Различают два основных типа излома: транскристаллитный (по телу зерна) и интеркристаллитный по границам зерен. Последний вид излома наблюдается в охрупченной стали и связан с выделением по границам зерен примесей, присутствующих в стали. Изломы обоих типов могут быть, и хрупкими и вязкими. Однако разрушение по границам зерен опасно, поскольку происходит с относительно небольшим поглощением энергии [10]. Изучение вида излома с помощью оптического микроскопа долгое время было единственным методом фрактографии. Вид излома определялся как кристаллический (хрупкий) или волокнистый (вязкий). Сканирующая электронная микроскопия дает большую глубину резкости изображения и позволяет изучать изломы в широком диапазоне увеличений. Специальная приставка к сканирующему микроскопу позволяет методом энергодисперсионного рентгено-спектрального микроанализа (EDX) определять химический состав дисперсных фаз и включений, а также локальных участков матрицы.

Цель работы – определение по виду излома качества брони советских самоходных артиллерийских установок СУ-85 и СУ-100, произведенных на Уралмаше и принимавших участие в боях Великой Отечественной войны.

2. Материалы и методики исследований

Образцы брони для исследования были отобраны с самоходных артиллерийских установок (САУ) СУ-85 и СУ-100, произведенных УЗТМ в 1943–1945 гг. и находящихся в экспозиции Музея военной техники Уральской горно-металлургической компании (г. Верхняя Пышма Свердловской обл.). Основой средних уралмашевских САУ являлись шасси и броневая защита корпуса танка Т-34. При бронировании САУ использовались бронелисты из той же броневой стали, что и при изготовлении бронекорпусов Т-34. Исследовали образцы броневой стали, место отбора и технологическая схема изготовления брони представлены в табл. 1. Традиционно фрактографические исследования проводят на изломах, полученных при определении ударной вязкости [11, 12]. Специфика настоящей работы заключалась в том, что образцы имели незначительные размеры, не превышающие 10–15 мм в наибольшем измерении. Поэтому проведение исследования, включающего определение ударной вязкости, не представлялось возможным. Малые размеры отобранных образцов обусловлены требованием минимальных повреждений музейных экспонатов.

Таблица 1 – Место отбора образцов и соответствующая технологическая схема изготовления брони

№ образца	Артиллерийская установка	Место отбора образца	Технология изготовления
№1	СУ-85	Борт внутри	Прокатка, закалка, отпуск
№2	СУ-100	Борт рубки правый	Прокатка, закалка, отпуск
№3	СУ-100	Маска пушки	Литье, закалка, отпуск
№4	СУ-85	Внешний край пробойны в лобовой плите	Прокатка, закалка, отпуск, попадание снаряда

Предварительно бронелисты, от которых отбирались образцы, были подвергнуты химическому анализу неразрушающим методом с использованием переносного оптико-эмиссионного спектрометра PMI Master Smart. Для выполнения измерения зачищали от краски участок поверхности 30×30 мм. Измерения производились непосредственно на экземплярах САУ, представленных в экспозиции музея. Результаты химанализа бронелистов представлены в табл. 2. Для сравнения приведен марочный состав брони 8С, по данным на 1942 г.

Таблица 2 – Химический состав бронелистов, по данным оптико-эмиссионного анализа

Образцы брони	Элементы, %							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S
Броня 8С	0,2-0,28	1,1–1,5	1,1–1,5	0,7–1,0	0,2–0,3	1,0–1,5	<0,035	<0,030
СУ-85 борт	0,05	0,98	0,98	0,88	0,19	1,30	0,03	0,02
СУ-100 борт	0,15	1,02	1,12	0,92	0,16	1,09	0,03	0,01
СУ-100 лоб	0,11	0,26	0,70	2,02	0,10	0,24	0,02	0,01
СУ-85 лоб	0,04	0,99	0,98	0,87	0,19	1,31	0,03	0,02

Исследование химического состава брони маски орудия СУ-100 не проводилось ввиду трудностей использования прибора PMI Master Smart на закругленных поверхностях. Для лобовой защиты СУ-100 использовалась броневая сталь толщиной 75 мм, состав которой отличался от стали 8С.

Химический анализ стали проводили также непосредственно на поверхности разрушения образцов методом EDX спектрометрии на приборе Inspect F (табл. 3).

Таблица 3 – Химический состав в изломах исследуемых сталей

Образцы брони	Элементы, %						
	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S
№ 1 СУ-85 борт	1,9	1,4	1,1	0	1,5	–	0,39
№ 2 СУ-100 борт	2,0	1,4	1,0	0,3	1,0	0,18	–
№ 3 СУ-100 маска	1,2	1,2	1,8	0,4	1,3	0,11	0,38
№ 4 СУ-85 лоб (край пробоины)	0,5	1,2	2,3	–	–	–	–

Состав металла, измеренный на поверхности излома, может несколько отличаться от состава в объеме образца. Маску пушки изготавливали методом литья, применяя сталь другого состава. Рентгеноспектральные методы не позволяют достаточно точно определять содержание легких элементов, поэтому в табл. 3 не приводится концентрация углерода, а к количественным данным по содержанию серы и фосфора следует относиться с осторожностью.

Образцы с надрезами, произведенными электроискровым методом, разрушали ударным нагружением с помощью молотка и зубила. Применение указанного способа потребовало нанесения надрезов с противоположных сторон образца. Нагружение образцов № 1 и 4 осуществляли при комнатной температуре, образцов № 2 и № 3 – после охлаждения в течение 15 мин под слоем жидкого азота. Измерение температуры образцов при нагружении не проводили. Охлаждение в жидком азоте позволяет охрупчить сталь с объемно-центрированной кубической решеткой и минимизировать пластическую составляющую деформации на поверхности разрушения [13]. В результате становится возможным выявить на поверхности разрушения микропоры, микротрещины, возникшие в стали в процессе выделки брони. Испытания при комнатной температуре приближены к реальным условиям разрушения (на поле боя). Поверхность разрушения исследовали методом сканирующей электронной микроскопии на приборе Inspect F (ф. FEI) с EDX спектрометром.

3. Результаты исследования

Химический состав образцов брони. Данные табл. 2 позволяют сделать ряд заключений. Содержание углерода на поверхности броневых листов, вероятно, вследствие обезуглероживания при термомеханической обработке, оказалось значительно ниже марочного состава. По основным легирующим элементам бортовые плиты СУ-85, СУ-100 и лобовая плита СУ-85 в основном соответствуют броневой стали 8С. Содержание фосфора и серы также находится в допустимых пределах. Существенно отличается состав стали лобовой плиты СУ-100: в ней в 2 раза выше содержание хрома. Содержание других легирующих элементов заметно отличается от состава брони 8С. Химический состав на поверхности изломов образцов стали (табл. 3) значительно отличается от данных табл. 2. Так, на поверхности разрушения образцов повышено содержание кремния, а в образце № 1 не обнаружено присутствие молибдена. Литая броня маски СУ-100 (образец № 3) содержит заметно больше хрома. Это связано с тем, что для литых элементов использовалась сталь другого состава. Образец

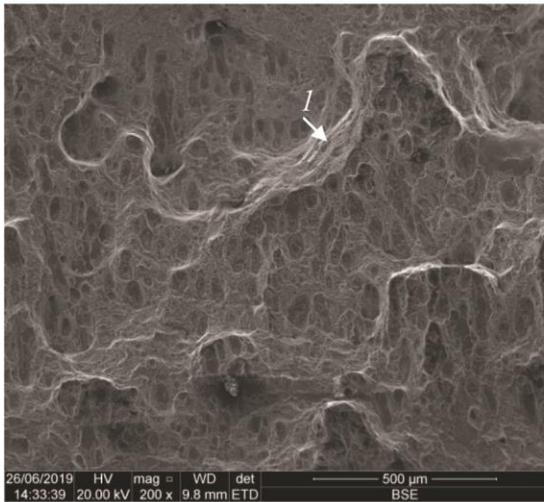
№ 4 кардинально отличается от других по химическому составу: в нем отсутствуют никель и молибден – элементы, пластифицирующие сталь, и высоко содержание хрома, способствующего повышению твердости закаленной стали. Содержание фосфора и серы в изломах исследованных сталей превышает показатели марочного состава. Негативное влияние фосфора проявляется в образовании сегрегаций, охрупчивающих границы зерен, поэтому обычно его содержание в броневых сталях, произведенных в первой половине XX в., было ограничено 0,035 мас. % [2], а в современных – 0,025 мас. % [14]. Следует отметить, что, по данным [2], в броневых сталях марок 2П (толщина листа 20 мм) и 71Л (толщина листа 75–90 мм), применяемых при постройке танков Т-34-76 и Т-34-85, допускалось содержание фосфора до 0,35 %. Сера взаимодействует с марганцем с образованием сульфидных частиц, а при очень малом ее содержании – пленочных выделений, также охрупчивающих сталь [2, 10, 14].

Структура излома и состав металла и включений образца № 1, отобранного от внутренней части броневой плиты борта СУ-85. Характерный вид поверхности разрушения образца представлен на рис. 1. Направление действия разрушающей нагрузки на этом и всех остальных рисунках сверху вниз. Видно, что излом имеет вязкий ямочный характер со сложным рельефом. Высокие гребни разделяют крупные ямки размером порядка 10^2 мкм (рис. 1 а). На дне этих ямок выделяются ямки размером в десятки микрометров, в центре которых, как правило, находится относительно крупная частица (рис. 1 б, 2). Границы между этими ямками образованы ямками еще более малого размера, формирующими сотовый рельеф (рис. 1 б). Включения на дне этих ямок не всегда наблюдаются, возможно вследствие их высокой дисперсности или отсутствия. Крупная частица на рис. 1 б по данным энергодисперсионного анализа, является сульфидом марганца (рис. 1 д). Поверхность, на которой расположена частица, представляет собой фасетку хрупкого скола (рис. 1 б). Присутствие частиц сульфида марганца в изломе стальных образцов и их роль в хрупком разрушении отмечались в ряде работ [15, 16]. Наблюдаются фасетки без частицы, последняя, по-видимому, осталась на противоположной поверхности разрушения. Обнаружены частицы другой морфологии. Шарообразная частица на рис. 1 в – по составу сложный окисульфид алюминия и кальция – является шлаковым включением. Присутствие таких частиц не сопровождается локальным хрупким разрушением стали, как это происходит на частицах сульфидов. Таким образом, несмотря на большое количество сульфидных и шлаковых включений разрушение материала образца № 1 в целом можно охарактеризовать как вязкое, сопровождающееся заметной пластической деформацией.

Структура излома образца № 2, отобранного от правого борта рубки СУ-100. Разрушение проведено после охлаждения образца в жидком азоте. Общий вид поверхности разрушения образца представлен на рис. 2.

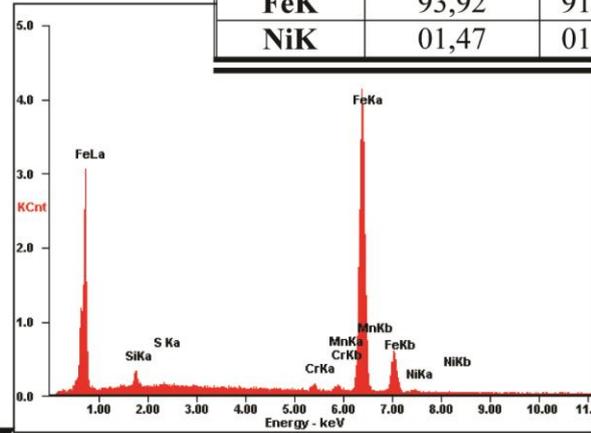
На поверхности разрушения видны многочисленные включения, микропоры и микротрещины (рис. 2 а). Характер разрушения – смешанный. Наряду с фасетками хрупкого скола (рис. 2 б) наблюдаются очаги вязкого разрушения (рис. 2 в). Несмотря на низкую температуру испытаний доля вязкой составляющей в изломе составляет около 50 %. Обнаружены неметаллические включения двух типов: сульфиды на основе MnS (рис. 2 в) и шлаковые частицы, образованные сложными оксидами алюминия, магния, кальция, кремния, округлой или неправильной формы (рис. 2 г). Большие поры, вероятно, остались на месте частиц, выпавших при разрушении образца. На рис. 2 б хорошо видно, что фасетки скола образовались на местах, где находились сульфиды (стрелкой указана часть разрушившейся частицы).

Структура излома и состав включений образца № 3 «СУ-100 маска». Образец разрушен после охлаждения в жидком азоте. Структура поверхности разрушения образца представлена на рис. 3.

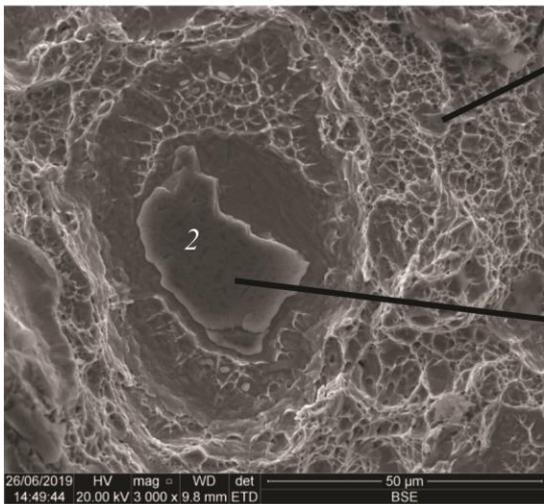


a

Element	Wt, %	At, %
SiK	01,91	03,73
SK	00,23	00,39
CrK	01,10	01,16
MnK	01,36	01,35
FeK	93,92	91,99
NiK	01,47	01,37

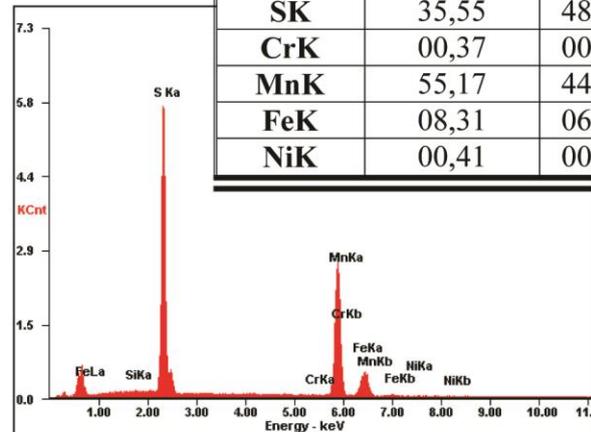


z

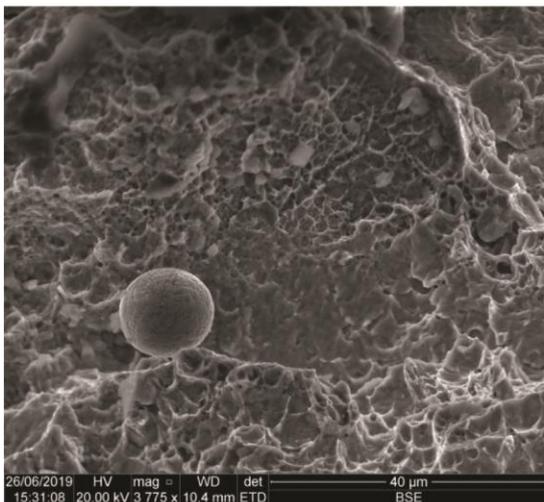


b

Element	Wt, %	At, %
SiK	00,18	00,28
SK	35,55	48,58
CrK	00,37	00,31
MnK	55,17	44,00
FeK	08,31	06,52
NiK	00,41	00,31



d



v

Рис. 1. Поверхность разрушения материала броневой плиты борта СУ-85 (образец № 1) (а-в) и рентгеновские спектры исостав матрицы (z) и неметаллического включения (сульфида марганца) (d). Испытания при комнатной температуре

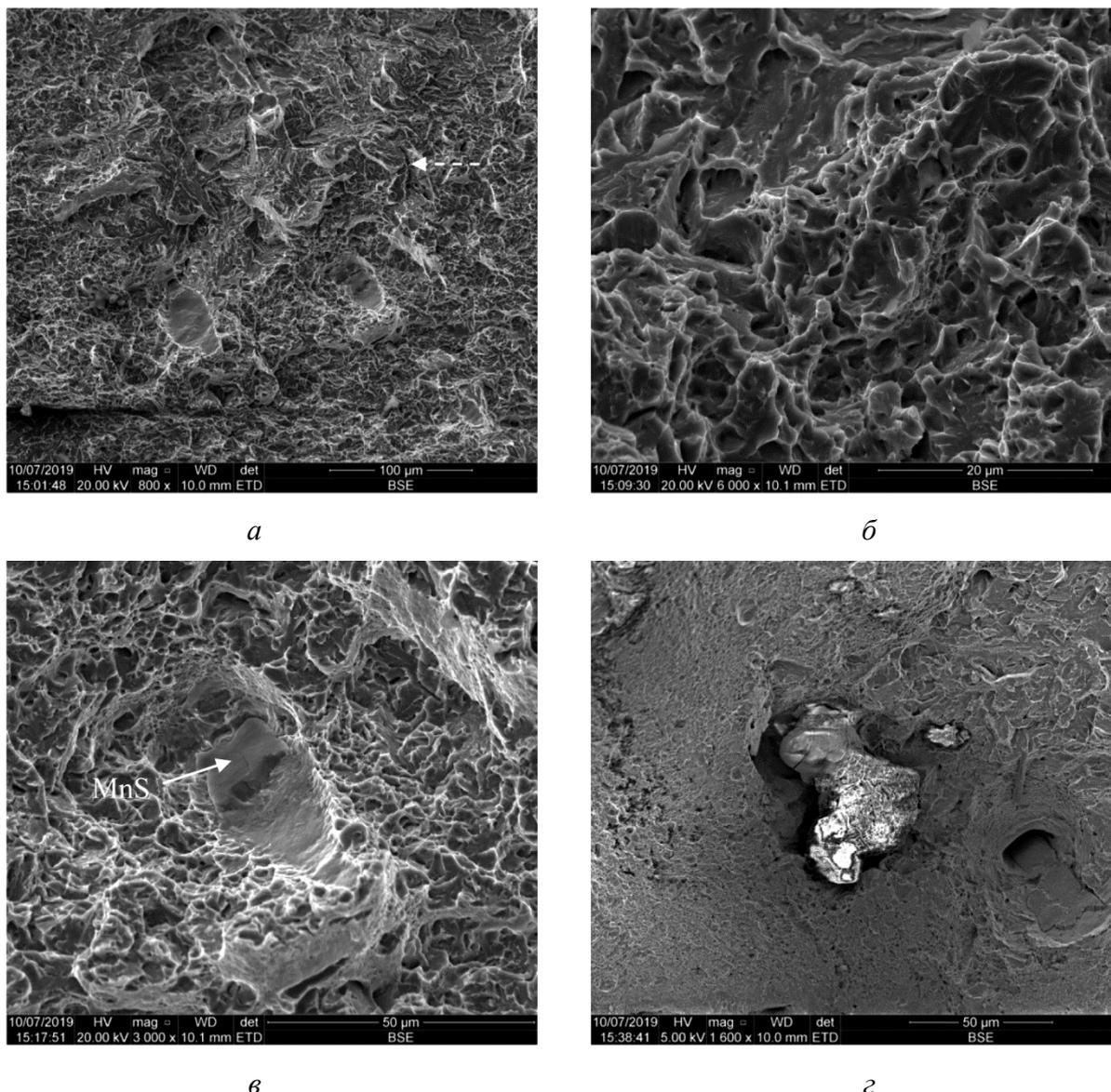
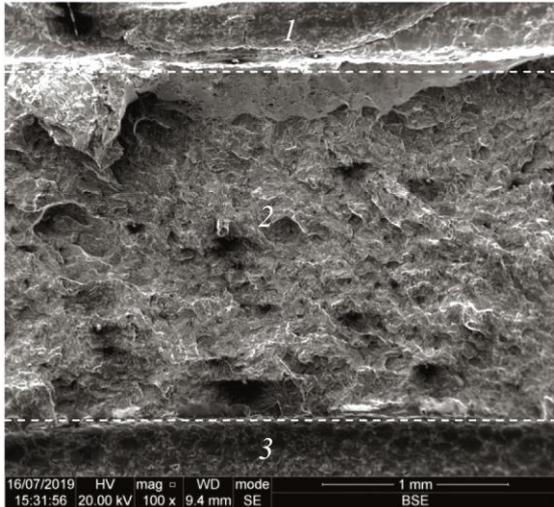
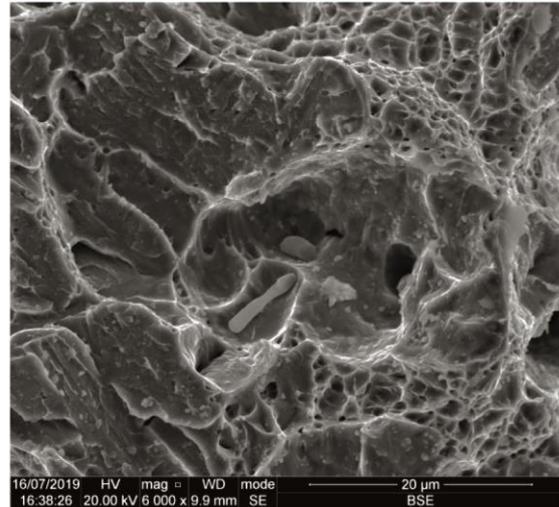


Рис. 2. Поверхность разрушения материала броневой плиты правого борта рубки СУ-100 (образец № 2): *а* – общий вид поверхности разрушения (пунктирной стрелкой указана одна из микротрещин); *б* – фасетки скола и часть частицы MnS; *в* – область вязкого разрушения; *г* – неметаллическое включение. Испытания при температуре жидкого азота

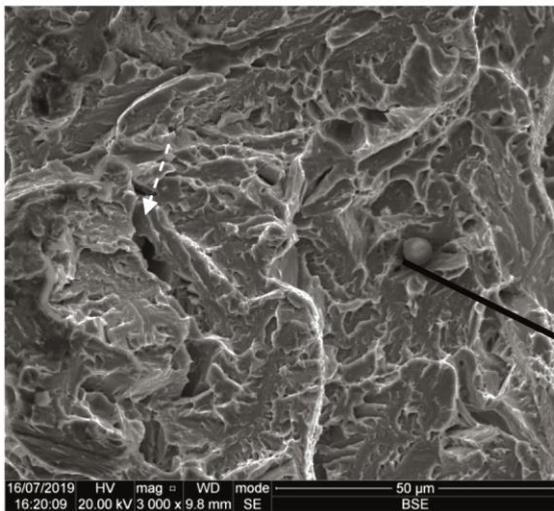
Области 1 и 3 соответствуют поверхности надреза, область 2 – поверхность разрушения (рис. 3 *а*). Разрушение смешанное, происходит квазисколом – преимущественно хрупкое разрушение по механизму внутризеренного скола (рис. 3 *б*), а в отдельных участках наблюдаются ямки, характерные для вязкого разрушения (рис. 3 *в*). Доля вязкой составляющей заметно меньше, чем в изломе образца № 2. Это может быть связано с различной обработкой: сталь образца № 3 – литая, а образец № 2 представляет прокатанную броневую плиту. На поверхности фасеток хрупкого скола присутствуют скопления сульфидных частиц различной формы и размеров (рис. 3 *г*). Часто по границам фасеток наблюдаются микротрещины (одна из микротрещин указана пунктирной стрелкой на рис. 3 *б*). Однородные мелкие ямки вязкого разрушения образуют сотовый рельеф (рис. 3 *в*, *г*). Присутствующие на поверхности разрушения частицы округлой формы являются шлаковыми включениями, состоящими из оксидов алюминия, кремния, марганца (рис. 3 *б*, *д*). В некоторых шлаковых частицах повышено содержание серы.



a

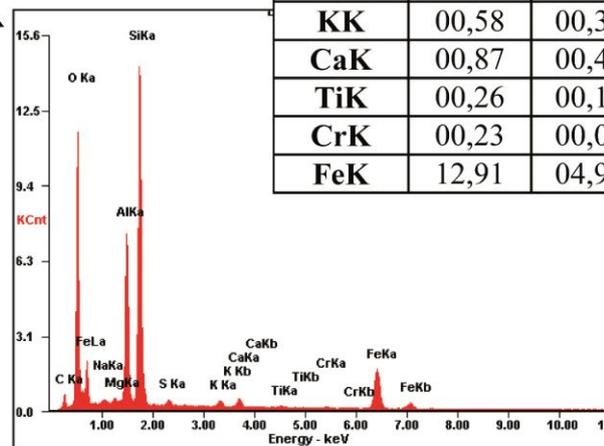


z

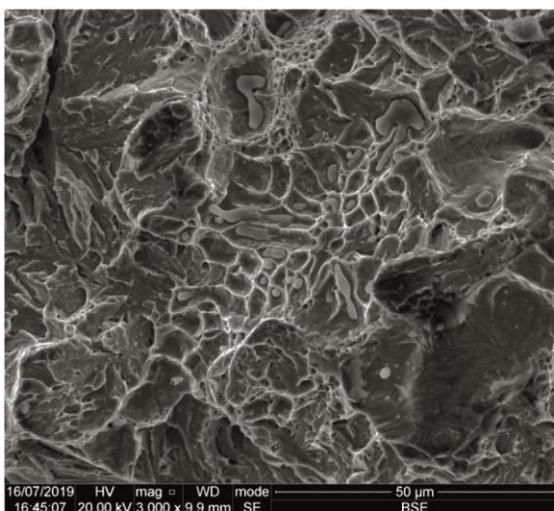


б

Element	Wt, %	At, %
CK	06,36	11,31
OK	38,89	51,95
NaK	00,48	00,44
MgK	00,36	00,32
AlK	11,81	09,36
SiK	26,69	20,31
SK	00,57	00,38
KK	00,58	00,32
CaK	00,87	00,46
TiK	00,26	00,12
CrK	00,23	00,09
FeK	12,91	04,94



д



е

Рис. 3. Поверхность разрушения материала маски СУ-85 (образец № 3) (*a-z*) и рентгеновский спектр и состав неметаллического включения (*д*).

Испытания при температуре жидкого азота

Структура излома образца № 4 от внешнего края пробойины в лобовой плите СУ-85.

На рис. 4 приведено изображение излома образца № 4, разрушенного при комнатной температуре. Разрушение носит квазихрупкий характер, на изломе наблюдаются фасетки внутризеренного скола, разделенные гребнями (рис. 4 *а*). Изображения поверхности, сделанные с наклоном образца, показывают, что появление гребней является результатом локальной вытяжки материала, т. е. пластической деформации (рис. 4 *б*). При наклоне также хорошо выявляются микротрещины и многочисленные поры. Таким образом, исследования химического состава и морфологических особенностей поверхности разрушения показали, что исследованный образец № 4 не является частью лобовой броневого плиты Су-85. Поскольку этот образец отобран с края пробойины, можно предположить, что в момент взрыва при пробитии броневого плиты осколки снаряда приплавилась к броне, и исследованный материал принадлежит не броне, а пробившему ее снаряду.

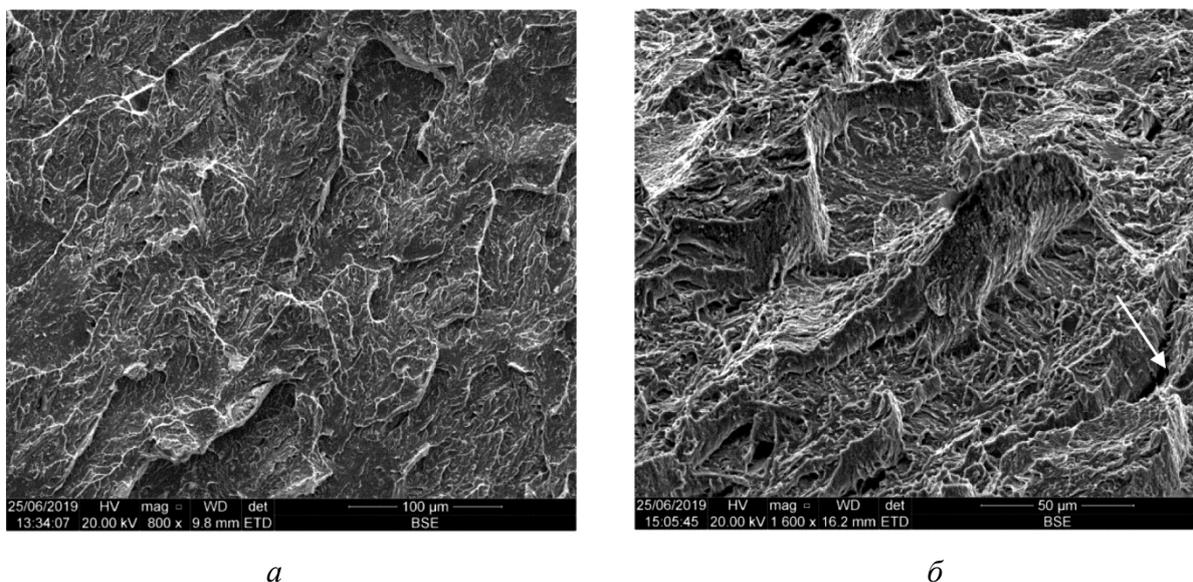


Рис. 4. Поверхность разрушения материала края пробойины в лобовой плите СУ-85 (образец № 4): *а* – общий вид поверхности разрушения; *б* – съемка проведена при наклоне образца 60°, (стрелкой указана одна из микротрещин). Испытания при комнатной температуре

4. Заключение

Исследование, проведенное на образцах броневого стали, отобранных от артиллерийских установок Су-85 и СУ-100, позволило сделать следующие выводы. Бронева катаная сталь, которая использовалась при изготовлении данных САУ, по содержанию основных легирующих элементов в основном соответствует марочному составу брони, разработанной в СССР в годы, предшествующие Великой Отечественной войне. В то же время, обнаружено большое количество сульфидных выделений в изломе исследованных сталей, что, по-видимому, обусловило высокое локальное содержания фосфора и серы. Кроме того, в стали присутствует заметное количество оксидных шлаковых включений. Тем не менее это не привело к преимущественному выделению примесей по границам зерен и существенному охрупчиванию стали. Излом при комнатной температуре вязкий транскристаллитный, и даже в стали, охлажденной и разрушенной в среде жидкого азота, сохраняется доля вязкой составляющей в изломе, а межзеренное разрушение не наблюдается ни в катаной, ни в литой стали.

Благодарность

Работа выполнена в рамках программы «Спин» Г.р. № АААА-А18-118020290104-2, «Давление» Г.р. АААА-А18-118020190104-3. Историческая часть исследования выполнена Вас.В. Запарием и Н.Н. Мельниковым в рамках темы базового бюджетного финансирования ИИиА «Россия в региональном измерении экономических, политических и социокультурных модификаций Новейшего времени».

Литература

1. История создания противоснарядной танковой брони 8С / Н. Н. Мельников, Б. А. Гижевский, Вас. В. Запарий, В. В. Запарий // Черные металлы. – 2019. – № 5. – С. 70–76.
2. Устьянцев С. В., Колмаков Д. Г. Боевые машины Уралвагонзавода. Танк Т-34. – Нижний Тагил : Издательский дом «Медиа-Принт», 2005. – 232 с.
3. О путях повышения противоснарядной стойкости катаной стальной брони для танков / С. И. Высоковский, Н. Н. Гуглин, Л. С. Левин, М. И. Маресев, Б. К. Филорикьян // Вопросы оборонной техники. Серия XX. – 1976. – Вып. 63.
4. Гудериан Г. Воспоминания солдата / пер. с нем. – М. : Воениздат, 1954. – 140 с.
5. Садовский В. Д., Гоппе Н. П. Превращения аустенита в хромоникелевой стали // Уральская металлургия. – 1937. – № 3. – С. 43–48
6. Зюзин В. И., Садовский В. Д., Баранчук С. И. Влияние легирующих элементов на положение мартенситной точки, количество остаточного аустенита и стойкость его при отпуске // Металлург. – 1939. – № 10–11. – С. 75–80.
7. Bain E. C. Functions of the Alloying Elements in Steel. – Cleveland : Amer Soc. Met., 1939. – 312 p.
8. Гудремон Э. Специальные стали. Т. 1 / пер. с нем. под ред. А. С. Займовского и М. Л. Бернштейна. – М. : Металлургиздат, 1959. – 952 с.
9. Завьялов А. С. К теории легирования и термической обработки стали. – М. : [б. и.], 1943. – 128 с.
10. Счастливец В. М., Кутьин А. Б., Смирнов М. А. Исправление структуры и изломов перегретой конструкционной стали. – Екатеринбург : УрО РАН, 2003. – 190 с.
11. Influence of welding technology on the structure, mechanical properties and fracture toughness of 09G2S steel welded joints / Yu. N. Saraev, S. V. Gladkovsky, S. V. Lepikhin, D. A. Dvoynikov, I. S. Kamantsev, V. E. Veselova // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2017. – Iss. 5. – P. 23–42. – DOI: 10.17804/2410-9908.2017.5.023-042. – URL: http://dream-journal.org/DREAM_Issue_5_2017_Saraev_Yu.N._et_al._023_042.pdf
12. Formation of the mechanical properties and fracture resistance characteristics of sandwich composites based on the 09G2S steel and the EP678 high-strength steel of various dispersion / S. V. Gladkovsky, S. V. Kuteneva, I. S. Kamantsev, R. M. Galeev, D. A. Dvoynikov // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2017. – Iss. 6. – P. 71–90. – DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.071-090. – URL: http://dream-journal.org/DREAM_Issue_6_2017_Gladkovsky_S.V._et_al._071_090.pdf
13. Estimating the damageability of a deformed metal / V. I. Levit, S. V. Smirnov, A. A. Bogatov, V. L. Kolmogorov, L. S. Davydova, E. I. Patrakov, A. V. Shalimova // Phys. Met. Metall. – 1982. – Vol. 54, no. 4. – P. 149–155.
14. Armour steels / I. G. Crouch, S. J. Cimpoeu, H. Li, D. Shanmugam // The Science of Armour Materials. Ser. Woodhead Publishing in Materials / ed. by I. G. Crouch. – Woodhead Publishing, 2017. – P. 55–115.
15. Садовский В. Д., Кутьин А. Б., Гербих Н. М. Транскристаллитное охрупчивание закаленной стали при задержке охлаждения в аустенитной области // ДАН СССР. – 1989. – Т. 305, № 3. – С. 611–613.
16. Sulfides in forgings of 40KhGM structural steel / N. I. Vorob'ev, D. A. Mirzaev, O. K. Tokovoi, E. A. Fominykh, I. L. Yakovleva // Russian metallurgy (Metally). – 2006. – Vol. 2006, no. 2. – P. 119–125. – DOI: 10.1134/S0036029506020030.

Received: 04.02.2020

Revised: 27.02.2020

Accepted: 06.03.2020

DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.038-060

A STUDY OF BORIDING METHODS, AN ANALYSIS OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE OBTAINED COATINGS

N. B. Pugacheva^{a)} and T. M. Bykova^{b)*}

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

^{a)}  <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>  nat@imach.uran.ru;

^{b)}  <https://orcid.org/0000-0002-8888-6410>  tatiana_8801@mail.ru

*Corresponding author. E-mail: tatiana_8801@mail.ru

Address for correspondence: 34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

Tel.: +7 (343) 362 30 43, fax: +7 (343) 374 53 30

The results of studying various boriding methods are presented, as well as an analysis of the structure and properties of boride coatings on steels of different chemical compositions. The features of the formation of these coatings and possible types of defects in them are analyzed. The results of studying the protective properties of boride coatings of different chemical and phase compositions are shown.

Keywords: coating, borides, microhardness, plastic deformation, diffusion.

Acknowledgment

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

References

1. Tarasov S.Yu., Trusova G.V., Kolubaev A.V., and Sizova O.V. Structural properties of boride coatings for triboengineering. *Metal Science and Heat Treatment*, 1995, vol. 37, pp. 257–260. DOI: 10.1007/BF01152230.
2. Maltseva L.A., Gervasiev M.A., Kutin A.B. *Materialovedenie* [Materials Science]. Ekaterinburg, Izd-vo UGTU-UPI Publ., 2007, 338 p. (In Russian).
3. Guzanov B.N., Kositsyn S.V., and Pugacheva N.B. *Uprochnyayushchie zashchitnye pokrytiya v mashinostroenii* [Reinforcing Protective Coatings in Engineering Industry]. Ekaterinburg, Ural. Otd. Ross. Akad. Nauk Publ., 2003. (In Russian).
4. Pugacheva N.B., Zamaraev L.M., Trushina E.B., Gurchenko T.M., and Zamjatin A.N. The features of destruction by the diffusion boride coating on the carbon constructional steel in thermo-cycling under loading conditions. *Uprochn. Tekhnol. Pokryt.*, 2011, no. 3, pp. 24–30. (In Russian).
5. Burnyshev I.N., Valiakhmetova O.M., and Mutagarova S.A. On the issue of steel borating. *Vestn. IzhGTU*, 2007, no. 4, pp. 124–127. (In Russian).
6. Mozberg R.K. *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1991, 448 p. (In Russian).
7. Dombrovskiy Y.M., Stepanov M.S. New aspects of surface impregnation in powder environment. *Vestnik of Don State Technical University*, 2011, vol. 11 (8–1), pp. 1217–1221. (In Russian).
8. Anfinogenov A.I., Chebykin V.V., Chernov Ya.B. Analysis of the development of chemical-thermal treatment of metals and alloys. *Melts*, 2005, no. 3, pp. 40–52. (In Russian).

9. Voroshnin L.G., Mendeleeva O.L., and Smetkin V.A. *Teoriya i tekhnologiya khimiko-termicheskoi obrabotki* [Theory and Technology of Chemical Thermal Treatment]. Moscow, Novoe Znanie Publ., 2010, 304 p. (In Russian).
10. *Perspektivnye materialy. Struktura i metody issledovaniya* [Promising Materials: Structure and Methods of Investigation, ed. by D.L Merson]. Tollyatti, Moscow, TGU-MISiS Publ., 2006, 536 p. (In Russian).
11. Malkova N.Yu. Disadvantages and advanced methods of chemical-thermal treatment. *Advances in Current Natural Sciences*, 2007, no. 12, pp. 106–107. (In Russian).
12. Gadalov V.N., Borsiakov A.S., Salnikov V.G., Kvashnin B.N., Zhelanova L.A. Special features of the structure and properties of boride diffusive layers, optimization of the technology for their production. *Proceedings of the South-West State University. Technics and Technologies*, 2012, no. 2 (1), pp. 73–77. (In Russian).
13. Kovenskiy I.M., Poveikin V.V. *Metallovedenie pokrytiy* [Metallography of Coatings]. M., Internet Engineering, 1999, 296 p. (In Russian).
14. Borsyakov A.S., Gadalov V.N., Kolmykov V.I. Electrolysis borating of metals and alloys. In: *Svarka i Rodstvennyye Tekhnologii v Mashinostroenii i Elektronike* [Welding and Cognate Processes in Mechanical Engineering and Electronics: Regional Collection of Scientific Papers]. Kursk, Kurskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskiy Universitet, 2002, iss. 5. (In Russian).
15. Nicholl A.R., Gruner H., Wuest G., Keller S. Future development in plasma spray coating. *Mater. Sci. Technol.*, 1996, vol. 2, no. 3, pp. 214–219. DOI: 10.1179/mst.1986.2.3.214.
16. Teplykh A.M., Golovin E.D., Bataev V.A., Golkovsky M.G., Bataev A.A., Gontarenko A.S., Drobyaz E.A. Borating of low-carbon steel with the application of non-vacuum electron-beam processing technology. In: *International Conference on Physical Mesomechanics, Computer Design and Development of New Materials*: Proceedings, Tomsk, IFPM Publ., 2011, pp. 494–496.
17. Pugacheva N.B., Bykova T.M. The degree of breakdown of the cemented and borated surfaces on details of the cutting pair of the hydromechanical slot perforator. *Obrabotka Metallov. Metal Working and Material Science*, 2015, no. 1 (66), pp. 51–59. (In Russian). DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-51-59.
18. Butukhanov V.A., Markhasaev Yu.A., Markhasaev A.V. A protective diffusion coating after saturation with boron and vanadium on steels for forming tools. In: *Electrical Engineering. Energy, Mechanical Engineering (EEM–2014)*: selected papers from The First International Scientific Conference of Young Scientists, in 3 sections, section 3, Novosibirsk, December 2–6 2014, Novosibirsk, Izd-vo NGTU Publ., 2014, pp. 194–198. (In Russian).
19. Shilyakin L.V., Veropakha D.N., Veropakha N.V. Method updating by liquid borides of steel products with the purpose of increase of their operational properties. *Izvestiya VUZov. Sev.-Kavkazsk. Region*, 2014, no. 1. pp. 48–51. (In Russian).
20. Gun G.S., Krivoshchapov V.V., Chukin M.V., Adamchuk V.S., Tsun A.M. *Uprochnyayushchie i vosstanavlivayushchie pokrytiya* [Strengthening and Recovering Coatings]. Chelyabinsk, Metallurgiya Publ., 1991, 160 p. (In Russian).
21. Sobachkin A.V., Yakovlev V.I., Loginova M.V., Dong Ya., Guriev A.M. Electric surfacing of wear resistant SHS-powder coating of working bodies of agricultural machines. In: *Effect of External Influences on the Strength and Plasticity of Metals and Alloys*: book of the International workshop articles, Barnaul, AltSTU publ., 2015, p. 104.
22. Nicholls J.R. Designing oxidation-resistant coating. *JOM*, 2000, vol. 52, no. 1, pp. 28–35. DOI: 10.1007/s11837-000-0112-2.
23. Keddam M., Chegroune R. A model for studying the kinetics of the formation of Fe₂B boride layers at the surface of a gray cast iron. *Appl. Surf. Sci.*, 2010, vol. 256, iss. 16, pp. 5025–5030. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.03.048.
24. Guriev A.M., Ivanov S.G., May Sh. The structure of boride coatings on steels for various purposes. In: *Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering (EEM–2014)*: selected

papers from The First International Scientific Conference of Young Scientists, in 3 sections, section 3, Novosibirsk, December 2–6 2014, Novosibirsk, Izd-vo NGTU Publ., 2014, pp. 194–198. (In Russian).

25. Matijević B. Evaluation of Boride Layer Growth on Carbon Steel Surfaces. *Metal Science and Heat Treatment*, 2014, vol. 56, pp. 269–273. DOI: 10.1007/s11041-014-9744-7.
26. Guzanov B.N., Kositsyn S.V., and Pugacheva N.B. *Reinforcing Protective Coatings in Mechanical Engineering*. Ekaterinburg, URO RAN Publ., 2004, 242 p. (In Russian).
27. Filippov M.A., Kositsina I.I., Gervasiev M.A. *Hardening and Protection of the Metal Surface*. Ekaterinburg, UrB RAS, 2012, 234 p. (In Russian).
28. Pugacheva N.B. Current trends in the development of heat-resistant coatings based on aluminides of iron, nickel and cobalt. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2015, iss. 3, pp. 51–82. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.051-082. Available at: https://www.dream-journal.org/DREAM_Issue_3_2015_Pugacheva_N._B._051_082..pdf
29. Denisyuk A.K., Zagulyaeva S.V., Potutkina E.N. Structure of borided layers in carbon steel. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, pp. 191–192. DOI: 10.3103/S1068798X11020080.
30. Guryev M.A., Guryev A.M., Ivanov A.G., Ivanov S.G. Analysis of the influence of the nature of alloying elements in high alloy steels on the processes of complex multicomponent diffusion borating. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2010, no. 5, pp. 155–157. (In Russian).
31. Pugacheva N.B., Bykova T.M., and Trushina E.B. The steel-basis structure influence on the diffusion boride coatings structure and properties. *Uprochn. Tekhnol. Pokryt.*, 2013, no. 4, pp. 3–7.
32. Kilic A., Kartal G., Urgen M., Timur S. Effects of electrochemical boriding process parameters on the formation of titanium borides. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2013, vol. 49, iss. 2, pp. 168–175. DOI: 10.3103/S1068375513020051.
33. Bykova T.M. The influence of the chemical composition of the steel on the structure and properties of diffusion boride coatings. Cand. Thesis, Ekaterinburg, 2016. (In Russian).
34. Afanasyev A.A., Pogonin A.A., Stativko A.A. Microhardness of diffusion boride layers on steels as a qualitative indicator of the surface. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 2008, no. 42, pp. 65–67. (In Russian).
35. Gadalog V.N., Borsyakov A.S., Salnikov V.G., Kvashnin B.N., Romanenko D.N., Lyakhov A.V. *Diffuznyye boridnye pokrytiya na zheleze, stalyakh i splavakh* [Diffusion Borided Coatings on Iron, Steels, and Alloys]. M., Kurs, 2012. (In Russian).
36. Goncharov I.Yu., Druchinina O.A., Kamyshanchenko N.V., Kovaleva M.G., Kolpakov A.Ya. Influence of thickness of coating on reconditioning the surface of substrate deformed during microindentation. *Deformatsiya i Razrushenie materialov*, 2006, no. 5, pp. 30–34. (In Russian).
37. Pugacheva N.B., Bykova T.M. The structure and properties of gradient boride coatings on steels. In: *Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures: Sourcebook*, 2016, pp. 210–211. (In Russian).
38. Tyurin A.G., Plotnikova N.V., Burov V.G., Veselov S.V., Golovin E.D. Surface-hardened materials fatigue cracking features. *Nauchnyy Vestnik Novosibirskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2007, no. 4, pp. 93–98. (In Russian).
39. Pugacheva N.B., Pavlyshko S.V., Trushina E.B., Zamyatin A.N. Investigation of mass transfer during tribological interaction of alloyed steels. *Journal of Friction and Wear*, 2012, vol. 33, no. 3, pp. 208–216. DOI: 10.3103/S1068366612030099.
40. Denisyuk A.K., Zagulyaeva S.V., Potutkina E.N. Effect of borating conditions on structure and hardness of borating layer. *Uprochn. Tekhnol. Pokryt.*, 2012, no. 2, pp. 29–31. (In Russian).
41. Lukyanonov D.S. The effect of residual macrostresses on the process of nucleation of quasi-brittle cracks in thermal diffusion coatings. *Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniya*, 2011, no. 7, pp. 266–267. (In Russian).

42. Borisenok G.V., Vasilyev L.A., Voroshnin L.G. et. al. *Khimiko-termicheskaya obrabotka: spravochnik* [Thermochemical Treatment of Metals and Alloys: reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981, 424 p. (In Russian).
43. Pugacheva N.B., Mazaev E.S. Protective properties of high-temperature combined coatings. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, 2001, no. 4. pp. 82–90. (In Russian).
44. Schlichting K.W. Padture N.P., Jordan E.H., Gell M. Failure modes in plazma-spraed thermal barrier coatings. *Materials Science and Engineering*, 2003, vol. A342, pp. 120–130. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00251-4.

Подана в журнал: 04.02.2020
УДК 620.18.186:621.793.6
DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.038-060

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ БОРИРОВАНИЯ, АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОЛУЧАЕМЫХ ПОКРЫТИЙ

Н. Б. Пугачева^{а)}, Т. М. Быкова^{б)}*

*Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация*

^{а)}  <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>  nat@imach.uran.ru;
^{б)}  <https://orcid.org/0000-0002-8888-6410>  tatiana_8801@mail.ru

* Ответственный автор. Электронная почта: tatiana_8801@mail.ru
Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация
Тел.: +7 (343) 362–30–43, факс: +7 (343) 374–53–30

Представлен аналитический обзор накопленного к настоящему времени опыта применения различных методов борирования, а также сравнительный анализ структуры и свойств получаемых боридных покрытий на сталях разного химического состава. Приведены результаты исследований защитных свойств боридных покрытий разного химического и фазового составов.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, сталь, покрытие, бориды, микротвердость, диффузия, износостойкость, термоциклирование.

1. Введение

В настоящее время накоплен довольно большой научно-производственный опыт применения защитных покрытий в условиях разгара и интенсивного изнашивания. Термодиффузионное борирование может повысить долговечность деталей машин и инструмента в подобных условиях эксплуатации не менее чем в 2–3 раза [1]. При этом отмечается, что для практического использования независимо от класса сталей и типоразмеров упрочняемых деталей наиболее приемлемыми можно считать порошковые смеси на основе карбида бора [2]. Однако в зависимости от габаритов штамповой оснастки известные способы термодиффузионного насыщения имеют разную эффективность.

Качественной и количественной характеристиками процесса борирования являются толщина диффузионного слоя, распределение концентрации бора по толщине покрытия его фазовый состав и свойства (твердость, износостойкость и термическая стабильность). Строение боридных покрытий существенно зависит от состава насыщающей смеси, способа борирования, температуры, длительности процесса и состава стали. Все эти факторы влияют на конечный результат и определяют физико-механические свойства поверхностного слоя после борирования. [3]. Поэтому вопросы создания функционально-градиентных поверхностных слоев, обладающих высокими механическими, технологическими и специальными свойствами, привлекают особое внимание, что делает актуальными исследования, направленные на создание таких поверхностей различными методами борирования.

Цель работы – провести сравнительный анализ основных способов нанесения боридного покрытия, а также полученных разными авторами сведений о влиянии химического состава стали-основы на структуру боридных покрытий и их защитные свойства.

2. История разработки метода борирования сталей

Возможность поверхностного насыщения железа и стали бором впервые была представлена Н. П. Чижевским. Ряд ценных эксплуатационных свойств, присущих борированному слою, привлек впоследствии к исследованию процесса насыщения поверхности стали бором многих отечественных и зарубежных исследователей [1–5]. Борированный слой отличается высокой твердостью и износостойкостью, с которыми не могут конкурировать другие способы химико-термической обработки (ХТО). С помощью борирования возможно повышение износостойкости в 3–50 раз по сравнению с термообработкой и в 1,5–15 раз, по сравнению с традиционными способами ХТО. Борированию могут подвергаться стали перлитного, ферритного и аустенитного классов. В соответствии с агрегатным состоянием насыщающей среды при ХТО можно выделить три основных метода борирования: в твердых, жидких и газообразных средах. Борирование в обмазках (из паст) занимает промежуточное положение между борированием в твердых и жидких средах. В зависимости от состава обмазки, температуры процесса и способа нагрева этот способ борирования приближается

к одному из них.

Борирование в *порошковых смесях* применяют для штампов горячего деформирования [6–8]. Мелкий штамповый инструмент более эффективно упрочняют при термодиффузионном насыщении в порошковых смесях на основе карбида бора. Этот способ отличается простотой технологии, высоким качеством покрытий, широкими возможностями по регулированию температуры насыщения и составов получаемых покрытий. Порошковые смеси для насыщения составляют на основе чистых материалов или их соединений (активная составляющая), окиси алюминия (инертный наполнитель) и галоидного активатора (калий тетрафторборат KF_4B) [9]. Применяют для твердого борирования температуру в пределах 800–1200 °С. Время и температуру борирования выбирают в зависимости от требуемой глубины борированного слоя.

Для штампов массой 1000–1500 кг наиболее приемлемой считается технология борирования из *обмазок (паст)*, при ней существует возможность местного борирования отдельных участков поверхности детали, а также совмещения процесса насыщения с упрочняющей термической обработкой [10]. Экспериментальные работы по оптимизации составов борлирующих обмазок показали необходимость присутствия в ней следующих компонентов:

- поставщиков активных атомов бора;
- добавок, стабилизирующих защиту от окисления;
- активаторов.

В качестве поставщика активных атомов бора в пастах применяется карбид бора. Последующий отжиг в защитной атмосфере при температурах (900–1050) °С в течение от 1 до 5 ч приводит к диффузионному насыщению поверхности деталей с получением достаточно качественных защитных слоев.

Приготовление борлирующих паст (суспензий) предусматривает использование различных связующих материалов. Основная роль связующего материала заключается в разбавлении пасты до необходимой консистенции и удержании ее на обрабатываемых поверхностях. Причем после помещения детали в предварительно нагретую печь это вещество должно испаряться или выгорать без существенного влияния на состояние основных компонентов. Обмазка не должна спекаться на упрочняемой поверхности и должна легко удаляться после окончания процесса ХТО. Особым преимуществом таких обмазок можно считать возможность длительной защиты обрабатываемых поверхностей от окисления в обычной печной атмосфере без использования дополнительного защитного оборудования и оснастки, что очень важно для химико-термической обработки крупногабаритных штампов. Даже при температурах обработки свыше 1000 °С доступ кислорода к обрабатываемой по-

верхности предотвращен, и процесс борирования развивается без нарушений в соответствии с протекающими химическими реакциями.

В силу ряда технологических преимуществ (местное насыщение поверхности, упрощение технологии, ускорение процесса) этот метод нашел применение в промышленности, хотя по сравнению с насыщением в порошках воспроизводимость результатов несколько ниже [11–12]. Присутствие в обмазке некоторых окислов металлов способствует защите активных компонентов от взаимодействия с кислородом. Наилучшие результаты получены при введении в состав пасты окислов железа (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4), которые резко повышают ее защитные свойства. При этом происходит не только предохранение активных компонентов от окисления при длительных высокотемпературных выдержках, но и облегчается отделение обмазки от упрочняемой поверхности после окончания химико-термической обработки. Несмотря на то, что разработанные борлирующие пасты содержат сравнительно дефицитный компонент – карбид бора, промышленное освоение их не вызывает особых проблем, так как затраты карбида бора в этом случае значительно меньше, чем в случае порошкового борирования [13].

Наиболее распространенным является *жидкостное электролизное борирование*. В тигель с расплавленной бурой помещают обрабатываемую деталь (катод) и графитовый стержень (анод), через которые пропускают постоянный ток для создания процесса электролиза. Оптимальная температура борирования 920–950 °С. Основным оборудованием являются печи-ванны с электрическим или газовым обогревом. В качестве насыщающей среды используют $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, который при плавлении теряет воду и диссоциирует с образованием атомарного бора. Образующийся атомарный бор диффундирует в поверхность детали. Оптимальный режим борирования: плотность тока на катоде 0,15–0,20 А/см², напряжение 2–14 В, температура 930–950 °С, выдержка от 2 до 4 ч; при этом получается диффузионный слой толщиной 0,15–0,35 мм [14, 15].

Повышение плотности тока, температуры и длительности процесса незначительно увеличивает толщину слоя при одновременном возрастании его хрупкости. Кроме того, повышение температуры приводит к уменьшению срока службы оборудования, увеличению расхода сырья и ухудшает структуру основного металла. Понижение температуры уменьшает скорость диффузии и замедляет процесс борирования.

Жидкостное (безэлектролизное) борирование можно проводить в любых печах-ваннах, обеспечивающих получение требуемой температуры. Обычно для этих целей применяют те же печи, что и для электролизного борирования. В качестве насыщающих сред используют расплавы на основе боратов щелочных металлов (преимущественно $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), в которые добавляют электрохимические восстановители: химически активные элементы (Al, Si, Ti, Ca, Mn, В и др.) или ферросплавы, лигатуры и химические соединения на их основе: ферромарганец (ФМн95), силикомарганец (СМн17), силикоцирконий (СиЦр50), карбид бора (B_4C), карбид кремния (SiC), силикокальций (СК25). Указанные вещества вводят в расплав в виде порошка с размером частиц 0,05–0,6 мм (в зависимости от природы и удельной массы восстановителя). Оптимальное содержание восстановителя в расплаве колеблется от 20 до 40 % по массе. Для получения двухфазных слоев ($\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$) можно рекомендовать следующие расплавы:

1. 60–70 % $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ + 40–30 % B_4C ;
2. 80 % $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ + 20 % СК25,

а для получения однофазных (Fe_2B) слоев:

1. 70 % $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ + 30 % SiC ;
2. 70 % $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ + 30 % СМн17.

Наиболее рационально применение данного способа борирования в мелкосерийном и серийном производствах [16–19].

К диффузионным методам нанесения покрытий относится насыщение из *газовой фазы* циркуляционным методом. Порошковая смесь в этом случае нагревается отдельно и за счет разложения газообразных соединений бора: диборана (B_2H_6), треххлористого бора (BCl_3), трехбромистого бора (BBr_3), триметила $(CH_3)_3B$ и других веществ, содержащих галогениды насыщающих элементов, подается в камеру с деталями. Этот способ позволяет увеличить температуру обработки с целью интенсификации процесса и решить вопрос насыщения покрытий на труднодоступные места деталей, например внутренние полости. Насыщение проводят при температурах (800–850) °С. Время выдержки варьируется от 2 до 6 ч. Существенное влияние на результаты борирования оказывает скорость газового потока. Для каждой установки она подбирается индивидуально. При рекомендованных режимах борирования на углеродистых сталях формируется слой боридов толщиной 50–200 мкм. К неконтактному методу нанесения покрытий относится насыщение в герметичной камере, когда порошок насыщающей смеси находится на дне под деталями. Такая камера позволяет проводить ХТО как в вакууме, так и в потоке любого инертного газа [20].

Среди методов получения покрытий интерес представляют газотермическое напыление и электронно-лучевое испарение. Из газотермических методов наиболее эффективным и универсальным можно считать *плазменное напыление*. Оно позволяет наносить практически любые высокотемпературные материалы, которые существенно не изменяют свой состав, и свойства под воздействием плазменной струи. Это дает возможность напылять покрытия заданного, контролируемого состава, что весьма важно при выборе рациональных систем защиты [21].

При *электронно-лучевом способе* нанесения покрытий специальный сплав испаряется в вакууме за счет энергии электронного пучка и затем осаждается на поверхность детали [22]. Достоинством метода является возможность осаждения практически любого сплава или соединения, что широко используется в практике создания высокотемпературных покрытий, особенно в случае опасности развития высокотемпературной коррозии. Необходимость сложного и дорогостоящего оборудования сдерживает широкое внедрение электронно-лучевых покрытий. Однако по мере повышения рабочих характеристик эти покрытия становятся основными на первых ступенях газовых турбин различного назначения [23]. Следует отметить, что основу напыляемых покрытий составляет металлическая матрица в виде твердых растворов на основе Fe, Ni, Co, в которой расположены частицы боридов хрома, титана, молибдена, ниобия.

В последние годы активно разрабатываются новые методы борирования, в которых с целью интенсификации процесса насыщения используются различные источники концентрированной энергии: токи высокой частоты, тлеющий разряд, лазерное излучение, энергия электронных или ионных пучков [24]. В настоящее время не существует метода борирования, который бы по своим технико-экономическим показателям значительно превосходил все остальные. Каждый из методов имеет достоинства и недостатки. Выбор метода должен проводиться с учетом характера обрабатываемых изделий, условий их работы, массовости изготовления и экономичности.

3. Влияние химического состава стали-основы на строение боридных покрытий

При насыщении в различных борсодержащих средах в зависимости от условий насыщения образуются боридные слои, сильно различающиеся по своему строению. На структуру боридного покрытия влияет фазовый состав стали, на которую нанесено покрытие, а также ряд других факторов (активность насыщающей среды, способ борирования, температура процесса).

Диффузия бора в поверхность стали приводит к образованию слоя с зазубренной границей, связанного с основным металлом или переходной зоной. На рис. 1 а представлен

схематический разрез двухфазного борированного слоя на поверхности углеродистой стали. Богатый бором темный слой FeB лежит у внешней границы, а ниже его расположена обедненная бором более светлая фаза Fe₂B. Затем идет диффузионная зона, в которой концентрация бора плавно уменьшается от 5 мас. % до его содержания в стали-основе. Обычно за толщину слоя принимают максимальную длину игл [25].

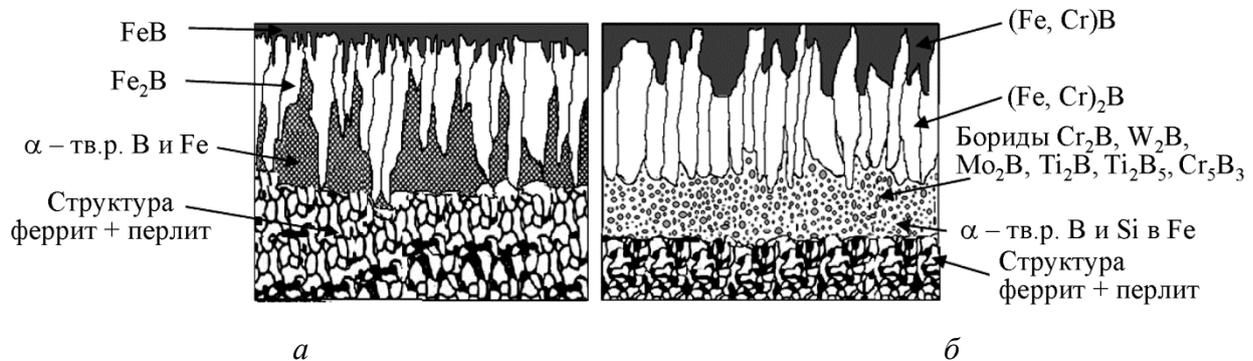


Рис. 1. Схематическая структура двухфазного боридного слоя: *а* – на углеродистой стали Ст3; *б* – на штамповой стали 4X5MFC

В соответствии с основными принципами диффузии углерод в процессе борирования оттесняется от поверхности стали и в насыщаемой зоне образуется зона сплошных боридов, химический состав, форма и структура которых напрямую зависит от химического состава стали. Углерод, вытесненный из поверхностного слоя, образует собственную зону повышенной концентрации, которая располагается непосредственно за слоем боридов. По ширине такая зона оказывается значительно шире боридной, и ее размеры определяются наличием или отсутствием в стали карбидообразующих элементов. Карбидообразующие элементы, резко снижая скорость диффузии углерода, уменьшают ширину слоя [26, 27]. Такие легирующие элементы стали, как ванадий, вольфрам, молибден, титан, никель, кремний, ограничивают рост борированного слоя и снижают его зазубренность (рис. 1 *б*) [28]. Боридное покрытие имеет практически плоскую границу при высоком содержании вышеперечисленных элементов в стали, что отрицательно влияет на связь слоя боридов с основным металлом.

Структура, глубина и состав переходной зоны определяют, в частности, характер распределения остаточных напряжений, прочность связи боридного слоя с основным металлом, склонность его к хрупкому разрушению, условия образования и развития усталостных трещин, возможность продавливания слоя и другие параметры, поэтому при выборе стали и режима борирования необходимо учитывать особенности формирования структуры переходной зоны [29].

Влияние температуры и времени насыщения на толщину боридного покрытия на среднеуглеродистой стали представлено на рис. 2 и 3. Из приведенных данных следует, что с повышением температуры скорость нарастания толщины борированного слоя заметно увеличивается. Рост глубины борирования как функция температуры подчиняется экспоненциальной зависимости. При увеличении времени выдержки при борировании наиболее быстрый рост слоя боридов наблюдается в первые часы насыщения. С течением времени скорость нарастания толщины покрытия уменьшается и начиная с 24 ч глубина слоя практически не увеличивается.

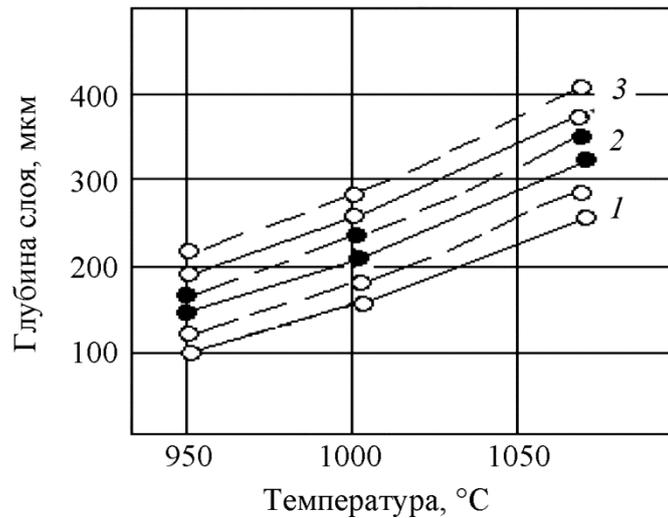


Рис. 2. Влияние температуры насыщения на глубину борированного слоя (сталь 40) [30]. Борирование из порошка карбида бора: 1, 2, 3 – насыщение в течение 3, 5 и 8 ч соответственно

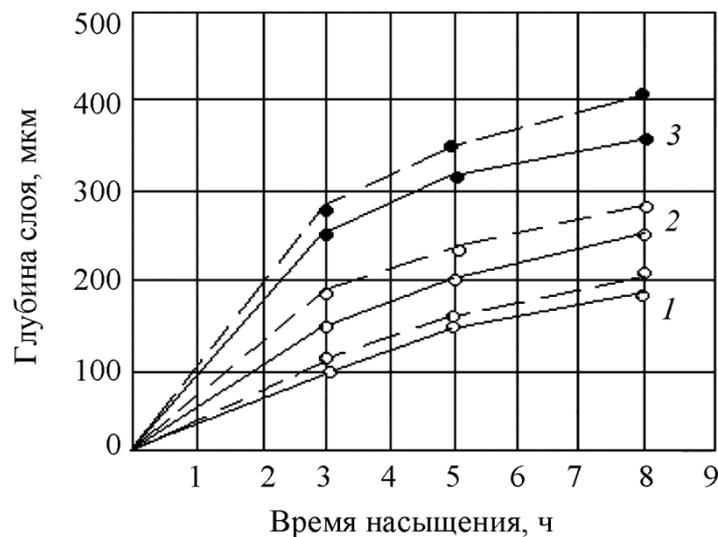


Рис. 3. Влияние времени насыщения из порошка карбида бора на глубину борированного слоя [31]: 1 – при 950 °С; 2 – при 1000 °С; 3 – при 1070 °С

Влияние легирующих элементов на глубину борированного слоя на среднеуглеродистой стали представлено на рис. 4. Из приведенных данных видно, что максимальное уменьшение глубины слоя наблюдается в сталях с молибденом и вольфрамом. Минимальное снижение глубины слоя дают никель и марганец. Хром и алюминий занимают промежуточное положение.

В работе [33] детально исследованы структура и характер распределения бора, железа и легирующих элементов по толщине полученных покрытий при насыщении из порошков карбида бора при температуре 900 °С в течение 6 ч на углеродистой (Ст3), штамповой (4Х5МФС) и легированной (12Х18Н10Т) сталях (рис. 5). Явно выделяются три зоны покрытия: внешняя (1), соответствующая бориду FeB, под ней зона (2), соответствующая бориду Fe₂B, и зона (3) на границе со сталью-основой, соответствующая твердому раствору бора в феррите с плавным уменьшением содержания бора.

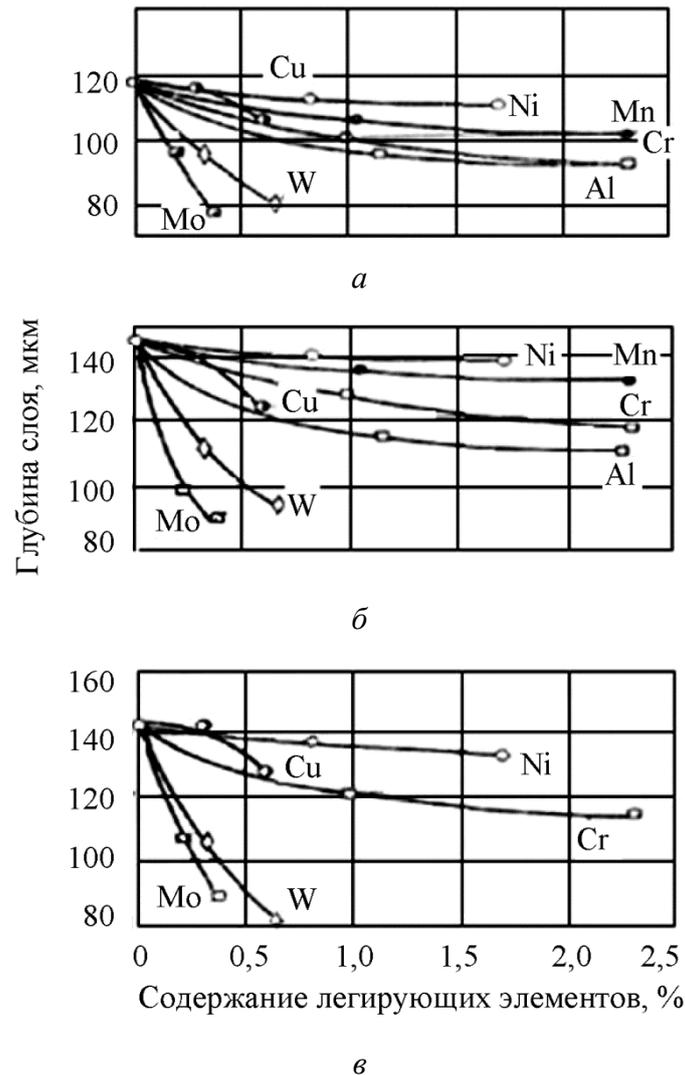
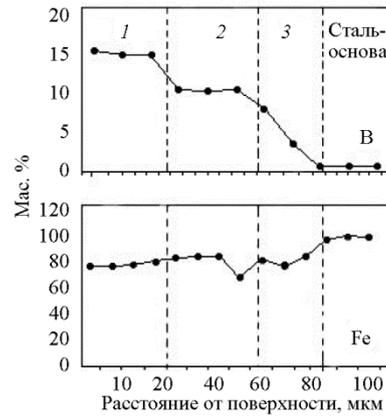
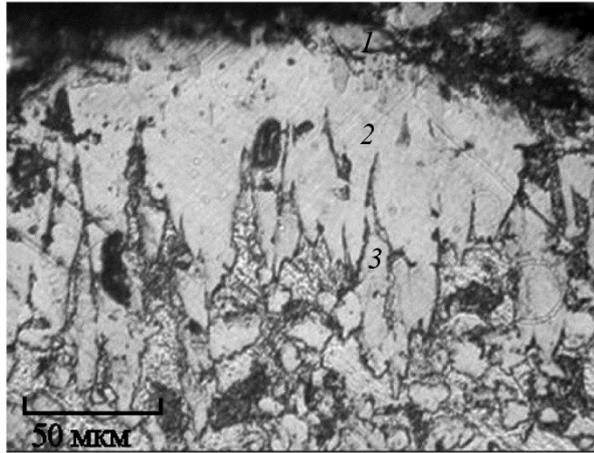
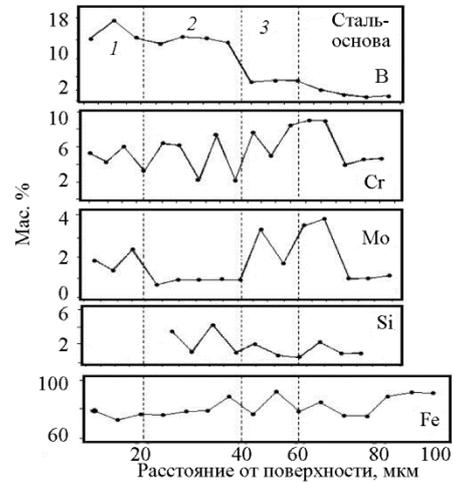
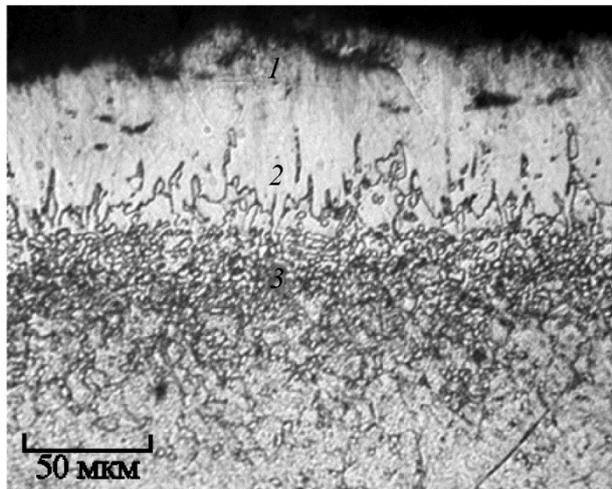


Рис. 4. Влияние легирующих элементов на глубину борированного слоя среднеуглеродистой стали (0,40 % C) ($t = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 6 ч) [32]. Насыщение: *a* – из порошка ферроборала; *б* – из порошка ферроборала 1–3 % хлористого аммония; *в* – из порошка карбида бора 4–3 % хлористого аммония

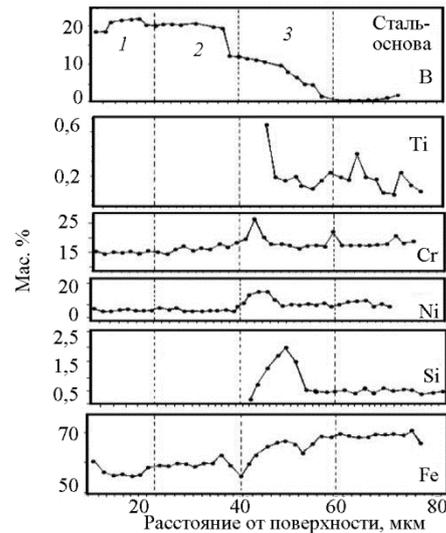
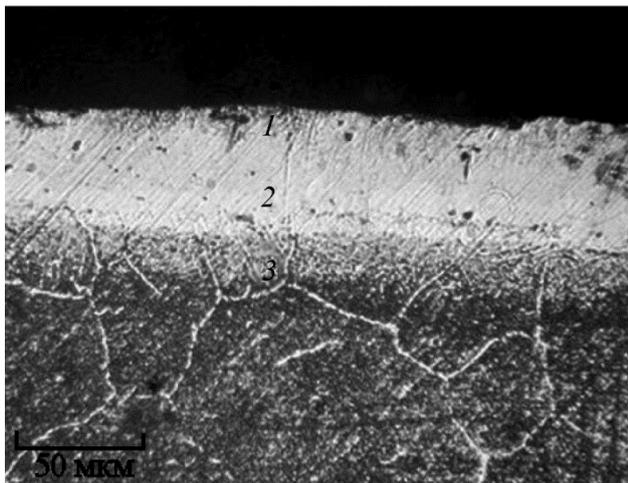
На углеродистой стали марки Ст3 (рис. 5 *a*) покрытие представляет собой вытянутые зерна борида FeB, основу покрытия составляет борид Fe_2B ; на границе со сталью образуется переходная зона твердого раствора бора в феррите (концентрация бора плавно уменьшается от 4 мас. % до нуля в стали-основе). На штамповой стали (4X5МФС) боридные иглы фазы Fe_2B скругляются (рис. 5 *б*). Фазы FeB и Fe_2B содержат хром в количествах, близких его содержанию в стали-основе, т. е. по сути являются легированными боридами $(\text{Fe},\text{Cr})\text{B}$ и $(\text{Fe},\text{Cr})_2\text{B}$. Переходная зона представляет механическую смесь борированного феррита, в котором содержание бора плавно убывает до нуля, и глобулярных частиц боридов хрома, вольфрама, молибдена и титана. На легированной стали (12X18H10T) покрытие не имеет выраженного игольчатого строения (рис. 5 *в*), как на углеродистой или штамповой сталях. На границах аустенитного зерна под покрытием наблюдаются мелкие бориды хрома.



a



б



в

Рис. 5. Микроструктура боридных покрытий, полученных в порошковой смеси:
a – Ст3; *б* – 4X5MΦC; *в* – 12X18H10T [33]

Следует отметить, что содержание бора в виде твердого раствора в феррите (или аустените на стали 12X18H10T) в переходной зоне на легированных сталях заметно меньше, чем на углеродистой стали марки Ст3. Это связано с оттеснением легирующих элементов на границу «покрытие – сталь» и соединением их с бором, сосредоточенным в переходной зоне с образованием глобулярных дисперсных частиц боридов. При этом твердый раствор вокруг этих частиц обедняется по бору. Кремний, как и углерод, не растворяется в бориде железа и практически весь оттесняется в переходную зону под слой фазы M_2B . Причем, если углерод как элемент внедрения довольно быстро проникает вглубь стали, то кремний как элемент замещения перемещается довольно медленно при температуре насыщения и тормозит фронт развития боридной фазы. Вытесненный кремний сосредоточивается между кристаллами M_2B , где резко повышается его концентрация: на стали 4X5MФС при среднем содержании кремния в основе на уровне $\sim 0,8$ мас. % после борирования концентрация этого элемента в довольно узком – толщиной (20–25) мкм – подслое на границе с покрытием может достигать 3,5 мас. %. Микротвердость зоны кремнистого феррита немного ниже, чем твердость стали-основы. Образование относительно мягкой прослойки кремнистого феррита на границе «покрытие – основа» может играть роль своеобразного демпфера, тормозящего возникновение и рост усталостных трещин при больших контактных нагрузках, характерных для штампов горячего деформирования.

Никель при борировании стали 12X18H10T, также как и кремний в штамповых сталях, оттесняется при диффузионном борировании в переходную зону на границе «покрытие–сталь», где его концентрация достигает 13 мас. %. Однако никель входит и в состав боридов в покрытии в количествах от 3 до 5 мас. %. Следует отметить, что при борировании стали 12X18H10T легирующие элементы в максимальной степени оказывают тормозящее действие на процесс формирования покрытия. Это проявляется не только в заметном уменьшении толщины борированного слоя, но и максимально высоких значениях концентрации бора в покрытии и, как следствие, увеличении количества боридов MB и более высоких значениях микротвердости, а также в изменении структуры покрытия. Процентное содержание боридов FeB на сталях приведено в табл. 1. [34]

Таблица 1 – Изменение количества боридов MB в сталях разного химического состава [35]

Марка стали	Об. % MB
Ст3	18
4X5MФС	50
12X18H10T	70

Таким образом, проанализированные экспериментальные данные позволяют утверждать, что диффузионные боридные покрытия на сталях формируют градиентную гетерофазную композицию, состав и строение которой определяется химическим составом основы.

4. Защитные свойства боридных покрытий

Основными характеристиками высокотемпературных защитных покрытий, определяющими их эксплуатационные свойства, являются высокая твердость, износостойкость и термостойкость. При борировании в порошке ферроборала основной структурной составляющей слоя является α -твердый раствор, поэтому твердость такого слоя невысока и равна 400–500 HV 0,1. Отмечается, что легирующие элементы (никель, хром, молибден) увеличивают твердость борированного слоя, причем сильнее всех действует хром [35, 36].

Из табл. 2 следует, что изменение времени насыщения с 3 до 8 ч не меняет высокой твердости слоя, она во всех случаях равна 1440–1450 HV 0,1, а с температуры 1100 до 1200 °С в слое наблюдается эвтектика, что приводит к резкому уменьшению твердости до 760 HV 0,1.

Таблица 2 – Микротвердость фаз борированного слоя стали 40 [36]

Условия насыщения		Структурные составляющие	Микротвердость, HV 0,1
Температура, °С	Время, ч		
950	8	Fe ₂ B	1440
1000	3		1450
1000	5		1450
1000	8		1440
1100	3	Эвтектика	840
1100	8		860
1200	5		760
1200	8		760

На основании указанных исследований отмечается, что в сталях, легированных титаном и ванадием при 1000 °С, твердость борированного слоя равняется 1430 HV 0,1. Такая же твердость получается и на армко-железе. В углеродистой стали твердость несколько ниже (1230–1260 HV 0,1) и достигается уже при 1000 °С. Дальнейшее повышение температуры не приводит к увеличению твердости [36].

Твердость борированного слоя хромистых и медьсодержащих сталей практически не отличалась от твердости слоя, полученного на углеродистой стали. Минимальную твердость имели слои на никелевых сталях (850 HV 0,1), а максимальную твердость – на нержавеющей стали. Закалка с повторного нагрева после борирования практически не сказывается на твердости слоя [37].

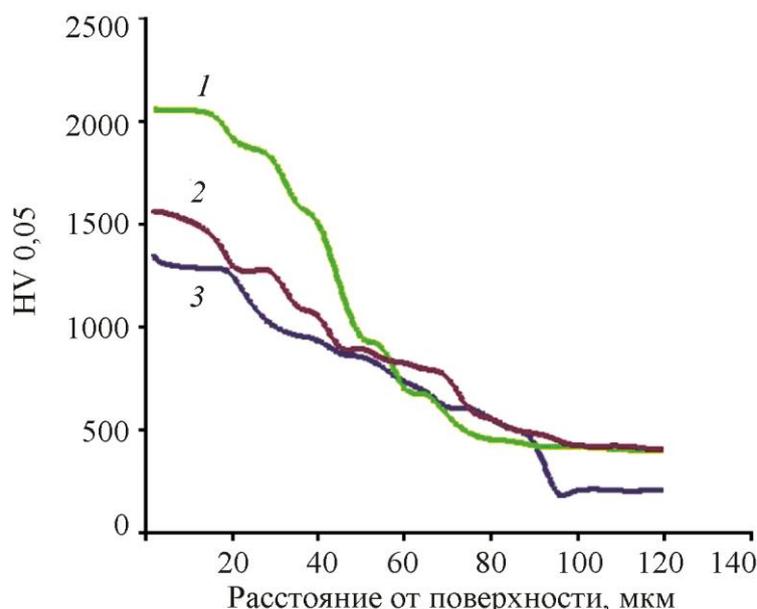


Рис. 6. Характер распределения значений микротвердости по толщине боридных покрытия на сталях разных марок: 1 – сталь 12X18H10T; 2 – сталь 4X5MФС; 3 – сталь Ст 3

Характер распределения значений микротвердости совпадает с распределением бора по толщине покрытий (рис. 6). Хорошо различимы три зоны покрытия: внешняя – с максимальной твердостью, соответствующая бориду FeB , вторая – Fe_2B и переходная на границе с основой, соответствующая твердому раствору бора в феррите. Разные значения твердости обусловлены разным соотношением количества боридов MB и M_2B в покрытиях на сталях разных систем легирования (табл. 2).

Высокую степень твердости обычно отождествляют с повышенным сопротивлением износу. Однако кроме твердости существуют другие параметры, определяющие сопротивление износу: чистота поверхности, преимущество холодной сварки, а также характер нагрузки. Два параметра слоя боридов благоприятны для сопротивления износу: это высокая твердость, 1700–2500 HV 0,05 и минимальная склонность к адгезионному схватыванию.

Боридные покрытия, обладая стабильным и низким коэффициентом трения [37], имеют хорошие антифрикционные свойства, что обеспечивает надежную защиту поверхности материала от разрушения. Следует заметить, что износ боридного покрытия происходит послойно, а неизменный по толщине химический состав образовавшихся при насыщении упрочняющих фаз (Fe_2B или $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$) стабилизирует скорость изнашивания на определенном уровне вплоть до полного исчезновения защитного слоя. В результате защитные свойства будут во многом определяться толщиной покрытия, которая должна быть максимально возможной при условии сохранения механических характеристик обрабатываемой стали [28, 30].

Испытания на износ при нагрузке 490 Н для боридного покрытия на Ст3 и 1274 Н для стали 4X5МФС показали, что происходит фрагментация боридов Fe_2B на Ст3 (рис. 7 а), существенная пластическая деформация боридов ($\text{Fe, Cr}_2\text{B}$), проявившаяся в формоизменении зерен боридов для стали 4X5МФС (рис. 7 б), поверхностный слой окисляется с образованием преимущественно оксида FeO и некоторого количества оксида Fe_2O_3 [38–40].

Большое влияние на сопротивление износу оказывает модифицирование боридного покрытия такими элементами, как алюминий и магний. Особенно заметно это проявляется при больших скоростях скольжения, когда сопротивление износу определяется окислительными реакциями и формированием на контактных поверхностях соответствующих окислов. Введение в защитный слой элементов, образующих плотные, бездефектные окислы (Al_2O_3 и MgO), оказалось весьма полезным и обеспечило повышение износостойкости обычных боридных покрытий. Если для горячей штамповки этот эффект вряд ли будет заметен, то для машин литья под давлением, где скорости относительного проскальзывания в пресс-формах значительно выше, модифицированные боридные покрытия должны быть более предпочтительны [41].

Исследования упрочненного слоя [42] на характер растрескивания боридных покрытий в условиях активного нагружения показали, что развитие пластической деформации в борированных образцах в значительной мере определяется толщиной покрытия. Характерной особенностью кривых растяжения является наличие площадки текучести при толщине боридного слоя менее 100 мкм и ее отсутствие в образцах с большей толщиной покрытия. На рис. 8 приведены зависимости, иллюстрирующие изменения механических характеристик поверхностно упрочненных образцов с увеличением толщины боридного слоя.

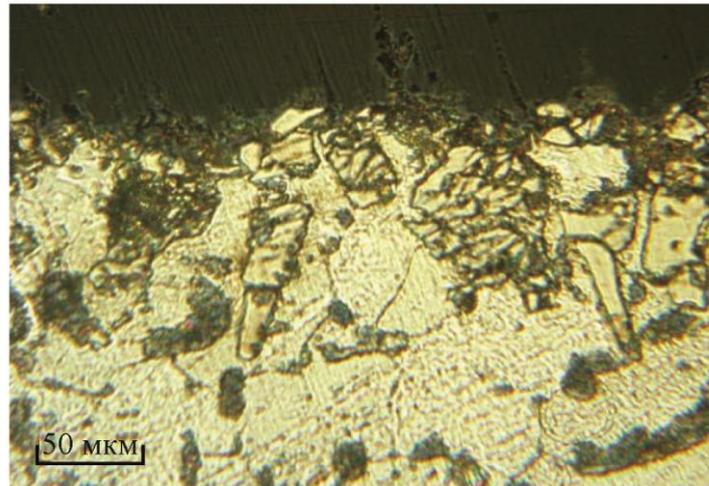
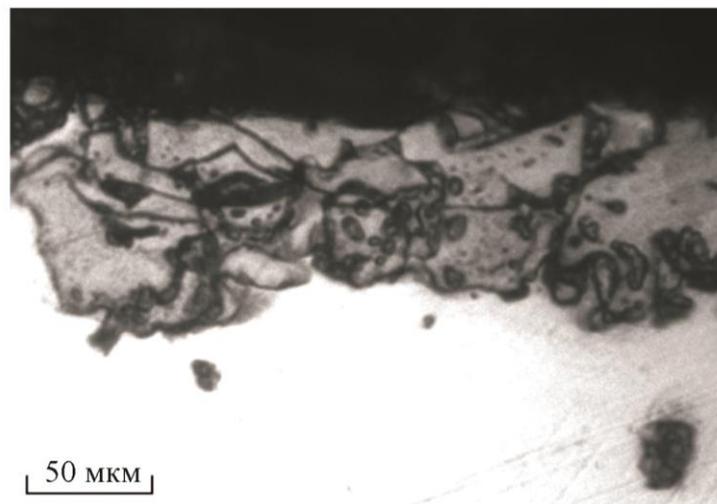
*a**б*

Рис. 7. Изменение строения боридного покрытия после трибологического воздействия: *a* – на стали Ст3 после испытаний при нагрузке 490 Н; *б* – на стали 4Х5МФС с закалкой при нагрузке 1274 Н [37]

Одной из важных характеристик боридных покрытий является термостойкость. Термостойкость – это стойкость покрытий к растрескиванию при смене температур. Она оценивалась по результатам испытаний на термоциклирование [4, 44, 45]. Растрескивание боридного слоя начинается после достижения уровня напряжений, соответствующего пределу текучести композиции. При этом растрескивание можно разделить на первичное и вторичное. Первичное растрескивание покрытия наблюдалось на начальных этапах пластического течения, в то время как вторичное растрескивание имело место при значительных степенях деформации. Признаками, по которым помимо степени деформации разделяли первичное и вторичное растрескивание, являются расположение (ориентация относительно направления приложенной нагрузки), длина и визуально определяемая глубина трещин.

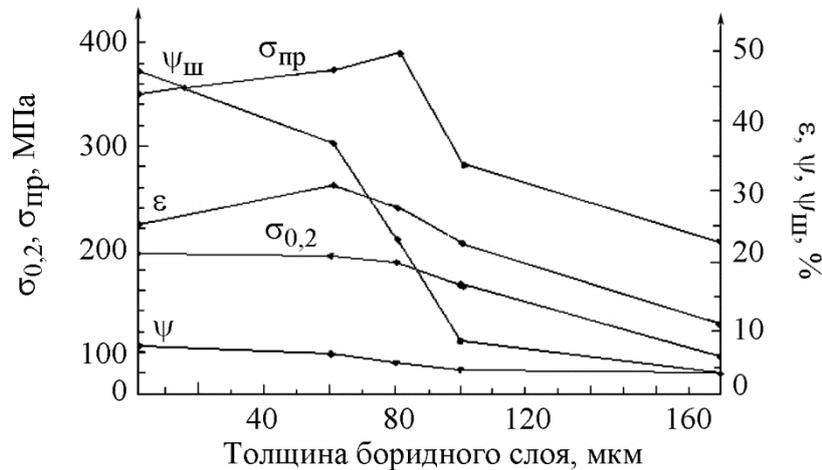


Рис. 8. Графики зависимости предела текучести $\sigma_{0,2}$, предела прочности $\sigma_{пр}$, относительного удлинения ϵ , относительного сужения ψ и относительного сужения в шейке $\psi_{ш}$ исследованных образцов от толщины δ боридного слоя [43]

Химический состав стали-основы оказывает заметное влияние на характер повреждения боридных покрытий при термоциклировании. При термоциклировании образцов из углеродистой стали (Ст3) с покрытием первоначально происходят локальные повреждения. В окислительной атмосфере (воздух, азот) это выражается в точечном «вспучивании» покрытия, на поверхности появляются «пузыри», размеры которых увеличиваются с ростом максимальной температуры цикла и количества циклов (рис. 9). Известно [3, 4], что бориды обладают достаточно высокой стойкостью к окислению. Однако проникновение кислорода на границу с основой может происходить достаточно быстро по линейным межзеренным границам боридных игл, расположенным перпендикулярно поверхности. Здесь кислород активно окисляет сталь-основу, происходит образование оксидов железа FeO и Fe₂O₃, которые выталкивают наружный борированный слой.



Рис. 9. Характер разрушения диффузионного боридного покрытия при термоциклировании 1000 °С на воздухе на Ст3 [4]

При проведении испытаний в воздушной атмосфере происходит интенсивное окисление стали под покрытием, вызывающее повреждение борированного слоя по всему пери-

метру поверхности. В момент разрушения образца довольно толстый слой окислов вместе с покрытием отшелушивается от поверхности, за счет чего диаметр образца в месте разрыва уменьшается на 1–1,5 мм.

При термоциклировании образцов штамповой стали (4Х5МФС) с боридным покрытием (толщиной 100 мкм) первичное растрескивание покрытия начинается вблизи галтельных переходов «головка – рабочая часть образца» и распространяется последовательно от галтельных переходов в направлении центра образца (рис. 10) [44, 46].

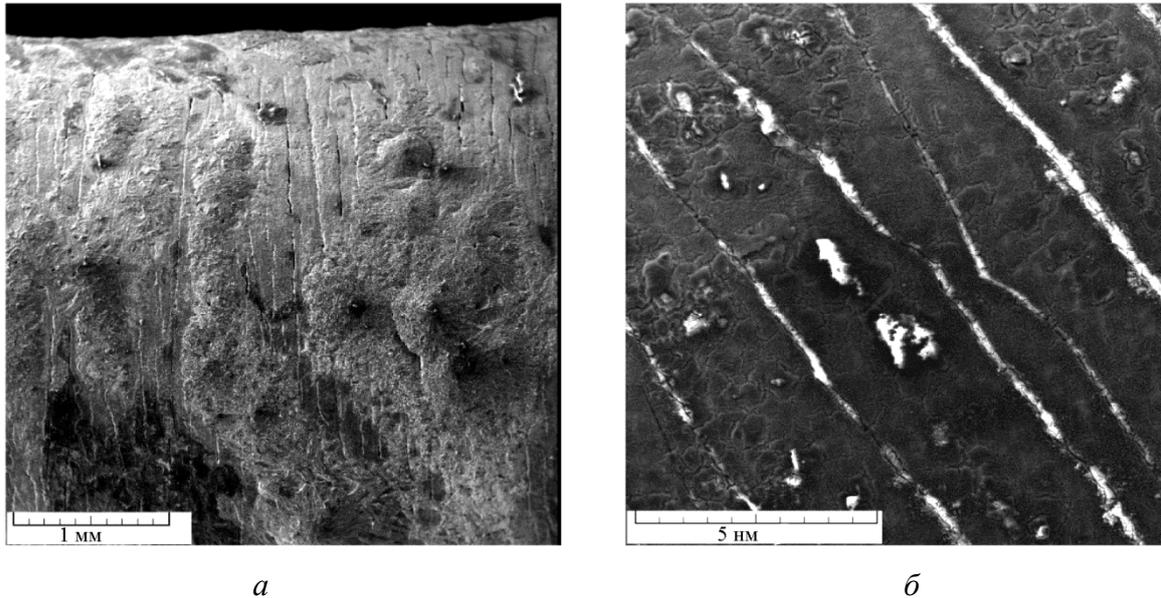


Рис. 10. Изображение разрушенных образцов с боридным покрытием на стали 4Х5МФС с образованием первичных трещин: *а* – возле головки образца; *б* – центральная часть

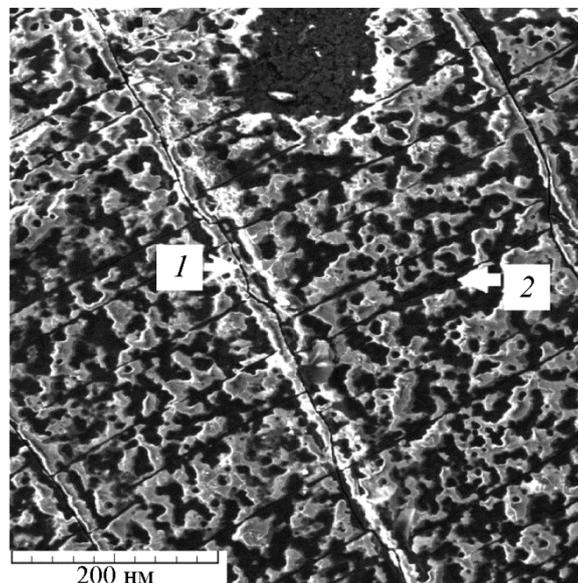


Рис. 11. Изображения первичных (1) и вторичных (2) трещин в боридном покрытии на стали 4Х5МФС [35]

По мере увеличения степени деформации начинается вторичное растрескивание боридного слоя, в ходе которого происходит разбиение первичных фрагментов покрытия

на более мелкие. Вторичные трещины являются поперечными и расположены параллельно первичным трещинам (рис. 11).

Вторичные трещины являются более тонкими и не всегда распространяются через всю ширину покрытия. Причиной вторичного растрескивания в образцах с тонкими покрытиями авторы [45] считают действие на покрытие локальных сжимающих напряжений, возникающих в результате деформации основы, претерпевающей впоследствии малого модуля упругости большие поперечные деформации. На границе раздела возникают мощные разориентированные поворотные моменты, приводящие к разворотам, а также происходит экструдирование фрагментов боридного слоя. Таким образом, ориентация вторичных трещин в тонких покрытиях преимущественно перпендикулярна направлению действия сжимающих напряжений.

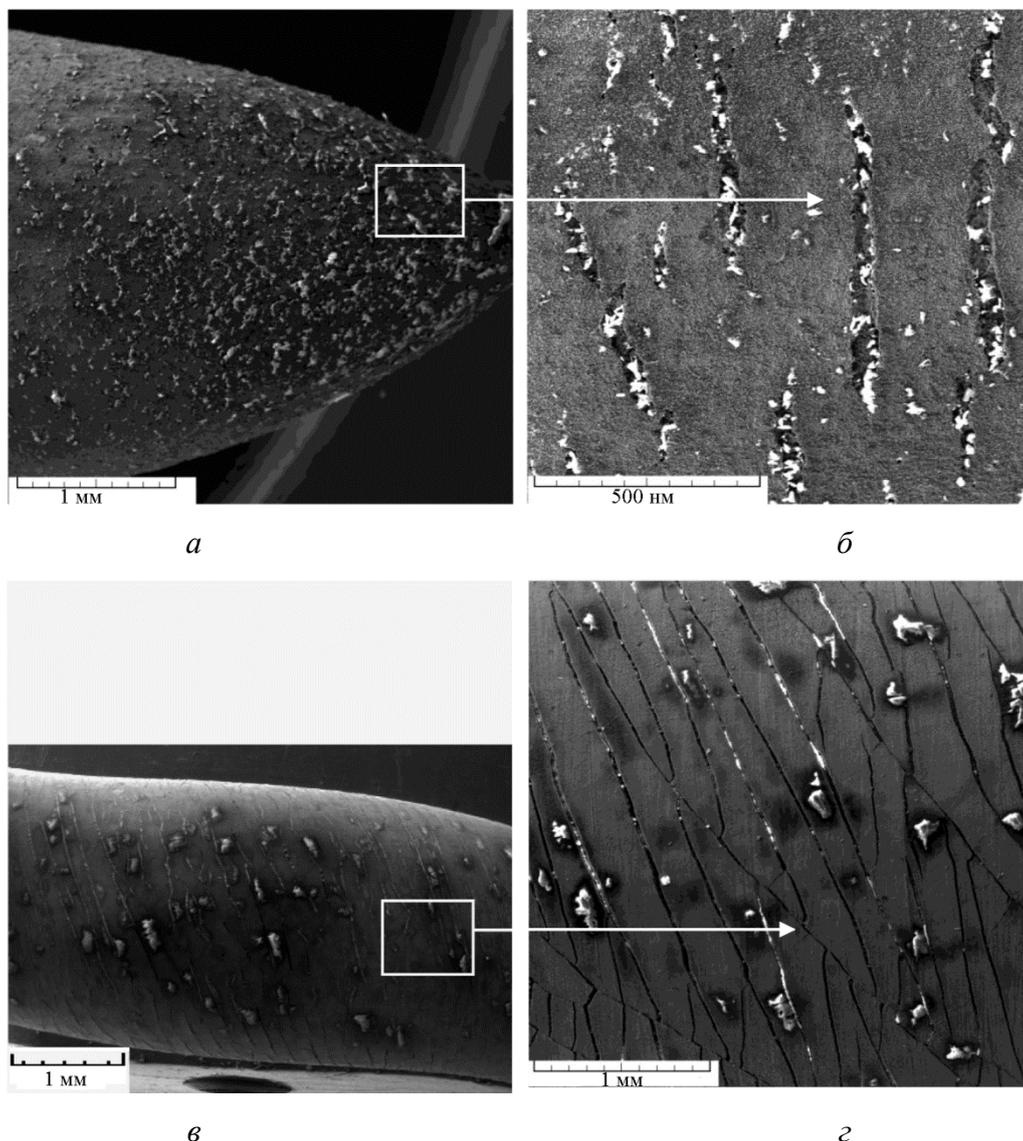


Рис. 12. Рельеф поверхности после термоциклирования при 1000 °С в водороде:
а, б – на Ст3; *в, г* – на стали 4Х5МФС [35]

В восстановительной атмосфере водорода исключено образование оксидов железа, поэтому «вспучивания» покрытия не обнаружено. Первые локальные повреждения покрытия выражаются в растрескивании слоя боридов. На Ст3 разрушение покрытия происходит путем квазипериодического прерывистого растрескивания, переходящего в стохастически

разветвленное при больших степенях деформации в области шейки (рис. 12 а, б). При этом его диаметр в области разрушения уменьшился от 5 до 0,65 мм (рис. 12 а), т. е. относительное сужение составило около 98 % [4]. Пластическая деформация образца произошла за счет стали-основы на участках растрескивания покрытия: на поверхности наблюдаются сохранившиеся «островки» покрытия с полосами деформации стали-основы между ними (рис. 12 б). По мере приближения к области разрушения, т. е. при увеличении степени пластической деформации образца и действующих растягивающих напряжений, увеличивается площадь поверхности, занятая деформированной сталью без покрытия, и уменьшается доля поверхности, занятая сохранившимся покрытием.

На стали 4Х5МФС растрескивание боридного слоя характеризуется формированием нескольких магистральных трещин. Игольчатая структура покрытия обуславливает возникновение значительного количества небольших по мощности мезоконцентраторов напряжений, поэтому покрытие растрескивается достаточно мелко. Разрушение покрытия носит характер квазипериодического растрескивания с образованием сплошных трещин по диаметру и вдоль образца, пластическая деформация составила всего 21 % (рис. 12 в, г).

Таким образом, разрушение борированного слоя при термоциклировании во многом определяется окислительными процессами, происходящими на поверхности. С этой точки зрения долговечность покрытия на сталях, содержащих не менее 5 мас. % хрома, существенно выше за счет образования защитного окисла Cr_2O_3 .

Испытания на удар (начальная высота падающего бойка 250 мм) показали, что при комнатной температуре покрытие весьма хрупкое и в зоне деформации (диаметр кратера 1,59 мм) практически все скалывается вплоть до диффузионной зоны. Нагрев образца позволяет сохранить сплошность покрытия даже при значительно больших деформациях (диаметр кратера при 200 и 600 °С – 1,86 и 2,01 мм соответственно). В этом случае только в отдельных участках внешней зоны, где присутствует высокобористая фаза FeB, наблюдаются отдельные сколы, но на глубину не более (20...30) % от толщины всего слоя. Таким образом, боридные покрытия могут с успехом работать в условиях ударных нагрузок при повышенных рабочих температурах.

5. Выводы

Из анализа литературы по вопросам нанесения боридных следует, что в зависимости от формы и размеров инструмента необходимо выбирать соответствующие насыщающие составы: борирующие пасты на основе карбида бора либо порошковые смеси. Существенное влияние на защитные свойства диффузионных боридных покрытий оказывает химический состав стали-основы. Основной путь повышения долговечности и эксплуатационных свойств диффузионных покрытий заключается в рациональном легировании покрытий элементами, повышающими термическую стабильность защитного слоя и сопротивление изнашиванию. Наиболее перспективными легирующими элементами являются хром и кремний. Для легирования покрытий хромом и кремнием следует использовать возможность естественного легирования из стали-основы, что достигается соответствующей технологией нанесения покрытий, определяющей механизм их формирования.

При прогнозировании конструкционной прочности материалов и элементов конструкций необходимо учитывать, что деформация детали в целом определяется свойствами тонкого поверхностного слоя, а разрушение – механизмом образования и развития трещин как на поверхности, так и в основе. Поэтому весьма важную роль играет термодиффузионное насыщение, в том числе бором остается основным методом нанесения защитных покрытий. Правильно выбранный состав порошковой насыщающей смеси и режим ХТО с учетом химического состава защищаемого материала позволяют получать качественные, высокоэффективные диффузионные покрытия.

Благодарность

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

Список литературы

1. Structural properties of boride coatings for triboengineering / S. Yu. Tarasov, G. V. Trusova, A. V. Kolubaev, and O. V. Sizova // Metal Science and Heat Treatment. – 1995. – Vol. 37. – P. 257–260. – DOI: 10.1007/BF01152230.
2. Мальцева Л. А., Гервасьев М. А., Кутыин А. Б. Материаловедение. – Екатеринбург : Изд-во УГТУ–УПИ, 2007. – 338 с.
3. Гузанов Б. Н., Косицын С. В., Пугачева Н. Б. Упрочняющие защитные покрытия в машиностроении : монография. – Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 2003. – 242 с.
4. Особенности разрушения диффузионного боридного покрытия на углеродистой стали в условиях термоциклирования под нагрузкой / Н. Б. Пугачева, Л. М. Замараев, Е. Б. Трушина, Т. М. Гурченко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 3. – С. 24–30.
5. Бурнышев И. Н., Валиахметова О. М., Мутагарова С. А. К вопросу борирования сталей // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2007. – № 4. – С. 124–127.
6. Мозберг Р. К. Материаловедение. – М. : Высшая школа. – 1991. – 448 с.
7. Домбровский Ю. М., Степанов М. С. Новые аспекты химико-термической обработки металлов в порошковых средах. // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11, № 8–1 (59). – С. 1217–1221.
8. Анфиногенов А. И., Чебыкин В. В., Чернов Я. Б. Анализ развития химико-термической обработки металлов и сплавов // Расплавы. – 2005. – № 3. – С. 40–52.
9. Ворошнин Л. Г., Менделеева О. Л., Сметкин В. А. Теория и технология химико-термической обработки. – М. : Новое издание. – 2010. – 304 с.
10. Перспективные материалы. Структура и методы исследования : учебное пособие / под ред. Д. Л. Мерсона. – Тольятти : ТГУ; Москва : МИСиС, 2006. – 536 с.
11. Малькова Н. Ю. Недостатки процессов и перспективные способы химико-термической обработки // Успехи современного естествознания. – 2007. – № 12. – С. 106–107.
12. Особенности структуры и свойств боридных диффузионных слоев, оптимизация технологии их получения / В. Н. Гадалов, А. С. Борсяков, В. Г. Сальников, Б. Н. Квашнин, Л. А. Желанова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Техника и технологии». – 2012. – № 2 (1). – С. 73–77.
13. Ковенский И. М., Поветкин В. В. Металловедение покрытий. – М. : Интернет Инжиниринг. – 1999. – 296 с.
14. Борсяков А. С., Гадалов В. Н., Колмыков В. И. Электролизное борирование металлов и сплавов // Сварка и родственные технологии в машиностроении и электронике : региональный сборник научных трудов. – Курск, Курский государственный технический университет. – 2002. – С. 13–22.
15. Future development in plasma spray coating / A. R. Nicholl, H. Gruner, G. Wuest, S. Keller // Mater. Sci. Technol. – 1996. – Vol. 2, no. 3. – P. 214–219. – DOI: 10.1179/mst.1986.2.3.214.
16. Борирование низкоуглеродистой стали с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой обработки / А. М. Теплых, Е. Д. Головин, В. А. Батаев, М. Г. Голковский, А. А. Батаев, А. С. Гонтаренко, Е. А. Дробяз // Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, Томск, 5–9 сентября, 2011 г. – Томск : ИФПМ СО РАН, 2011. – С. 494–496.
17. Пугачева Н. Б., Быкова Т. М. Характер повреждений цементованных и борированных поверхностей на деталях режущей пары гидромеханического щелевого перфоратора //

- Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 1 (66). – С. 51–59. – DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-51-59.
18. Бутуханов В. А., Мархасаева Ю. А., Мархасаев А. В. Диффузионное защитное покрытие после насыщения бором и ванадием на сталях для штампового инструмента // Электротехника. Энергетика. Машиностроение : сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых. – Новосибирск, 2014. – С. 195–198.
19. Шилякин Л. В., Веропаха Д. Н., Веропаха Н. В. Метод модификации жидкостным борированием стальных изделий с целью повышения их эксплуатационных свойств // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия «Технические науки». – 2014. – № 1. – С. 48–51.
20. Упрочняющие и восстанавливающие покрытия / Г. С. Гун, В. В. Кривошапов, М. В. Чукин, В. С. Адамчук, А. М. Цун. – Челябинск : Metallurgy, 1991. – 160 с.
21. Electric surfacing of wear resistant SHS-powder coating of working bodies of agricultural machines / A. V. Sobachkin, V. I. Yakovlev, M. V. Loginova, Ya. Dong, A. M. Guriev // Effect of External Influences on the Strength and Plasticity of Metals and Alloys : book of the International workshop articles / ed. by M. D. Starostenkov. – Barnaul : AltSTU, 2015. – P. 104.
22. Nicholls J. R. Designing oxidation-resistant coating // JOM. – 2000. – Vol. 52, no. 1. – P. 28–35. – DOI: 10.1007/s11837-000-0112-2.
23. Keddam M., Chegroune R. A model for studying the kinetics of the formation of Fe₂B boride layers at the surface of a gray cast iron // Appl. Surf. Sci. – 2010. – Vol. 256, iss. 16. – P. 5025–5030. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.03.048.
24. Гурьев А. М., Иванов С. Г., Мэй Ш. Структура боридных покрытий на сталях различного назначения // Электротехника. Энергетика. Машиностроение : сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых. – 2014. – С. 199–201.
25. Matijević B. Evaluation of Boride Layer Growth on Carbon Steel Surfaces // Metal Science and Heat Treatment. – 2014. – Vol. 56. – P. 269–273. – DOI: 10.1007/s11041-014-9744-7.
26. Гузанов Б. Н., Косицин С. В., Пугачева Н. Б. Упрочняющие защитные покрытия в машиностроении. – Екатеринбург : УрО РАН. – 2004. – 242 с.
27. Филиппов М. А., Косицина И. И., Гервасьев М. А. Упрочнение и защита поверхности металла. – Екатеринбург : УрО РАН. – 2012. – 234 с.
28. Pugacheva N. B. Current trends in the development of heat-resistant coatings based on aluminides of iron, nickel and cobalt // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. – 2015. – Iss. 3. – P. 51–82. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.051-082. – URL: https://www.dream-journal.org/DREAM_Issue_3_2015_Pugacheva_N._B._051_082.pdf
29. Denisyuk A. K., Zagulyaeva S. V., Potutkina E. N. Structure of borided layers in carbon steel // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31. – P. 191–192. – DOI: 10.3103/S1068798X11020080.
30. Анализ влияния природы легирующих элементов в высоколегированных сталях на процессы комплексного многокомпонентного диффузионного борирования / М. А. Гурьев, А. М. Гурьев, А. Г. Иванов, С. Г. Иванов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2010. – № 5. – С. 155–157.
31. Pugacheva N. B., Bykova T. M., and Trushina E. B. The steel-basis structure influence on the diffusion boride coatings structure and properties // Uprochn. Tekhnol. Pokryt. – 2013. – No. 4. – P. 3–7.
32. Effects of electrochemical boriding process parameters on the formation of titanium borides / A. Kilic, G. Kartal, M. Urgen, S. Timur // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2013. – Vol. 49, iss.2. – P. 168–175. – DOI: 10.3103/S1068375513020051.
33. Быкова Т. М. Влияние химического состава стали на структуру и свойства диффузионных боридных покрытий : дис. канд. техн. наук : 05.16.09. – Екатеринбург, 2016. – 164 с.

34. Афанасьев А. А., Погонин А. А., Стативко А. А. Микротвердость диффузионных боридных слоев на сталях как качественный показатель поверхности // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2008. – № 42. – С. 65–67.
35. Диффузионные боридные покрытия на железе, сталях и сплавах : монография / В. Н. Гадалов, А. С. Борсяков, В. Г. Сальников, Б. Н. Квашнин, Д. Н. Романенко, А. В. Ляхов. – Москва : Курс, 2012.
36. Влияние толщины покрытия на восстановление деформации при микроиндентировании поверхности подложки / И. Ю. Гончаров, О. А. Дручинина, Н. В. Камышанченко, М. Г. Ковалева, А. Я. Колпаков // Деформация и разрушение материалов. – 2006. – № 5. – С. 30–34.
37. Пугачева Н. Б., Быкова Т. М. Строение и свойства градиентных боридных покрытий // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций : сборник материалов. – 2016. – С. 210–211.
38. Особенности усталостного разрушения поверхностно-упрочненных материалов / А. Г. Тюрин, Н. В. Плотникова, В. Г. Буров, С. В. Веселов, Е. Д. Головин // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2007. – № 4. – С. 93–98.
39. Investigation of mass transfer duaring tribological interaction of alloyed steels / N. B. Pugacheva, S. V. Pavlyshko, E. V. Trushina, A. N. Zamyatin // Journal of Friction and Wear. – 2012. – Vol. 33, no. 3. – P. 208–216. – DOI: 10.3103/S1068366612030099.
40. Денисюк А. К., Загуляева С. В., Потуткина Е. Н. Влияние условий борирования на структуру и твердость борированного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 2. – С. 29–31.
41. Лукьянонов Д. С. Влияние остаточных макронапряжений на процесс зарождения квазихрупких трещин в термодиффузионных покрытиях // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 7. – С. 266–267.
42. Химико-термическая обработка металлов и сплавов : справочник / Г. В. Борисенко, Л. А. Васильев, Л. Г. Ворошнин и др. – М. : Металлургия, 1981. – 424 с.
43. Пугачева Н. Б., Мазаева Е. С. Защитные свойства высокотемпературных комбинированных покрытий // Физика и химия обработки материалов. – 2001. – № 4. – С. 82–90.
44. Failure modes in plazma-spraed thermal barrier coatings / K. W. Schlichting, N. P. Padture, E. H. Jordan, M. Gell // Materials Science and Engineering. – 2003. – Vol. A342. – P. 120–130. – DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00251-4.

Received: 07.03.2020
Revised: 06.04.2020
Accepted: 10.04.2020
DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.061-075

EXACT SOLUTION FOR DESCRIBING A UNIDIRECTIONAL MARANGONI FLOW OF A VISCOUS INCOMPRESSIBLE FLUID WITH THE NAVIER BOUNDARY CONDITION. PRESSURE FIELD INVESTIGATION

N. V. Burmasheva^{a)*} and E. Yu. Prosviryakov^{b)}

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

^{a)}  <https://orcid.org/0000-0003-4711-1894>  nat_burm@mail.ru;

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

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

Address for correspondence: 34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation
 Tel.: +7 (343) 375 35 76; fax: 374 53 30

The article studies the properties of the pressure field in a unidirectional thermocapillary flow of a viscous incompressible fluid in an infinite horizontal layer of a given thickness. A distinctive feature of the considered boundary value problem is the inclusion of the Navier slip condition at the lower (solid) boundary of the layer instead of the classical condition of fluid no-slip on the solid surface. Modeling of the properties of the described flow is carried out using the system of Oberbeck-Boussinesq equations, its exact solution being obtained. The exact solution belongs to the Ostroumov-Birikh class. Hydrodynamic fields are described by polynomials. The degree of the polynomial describing the background pressure relative to the vertical coordinate is eight. The horizontal (longitudinal) pressure gradients are parabolic functions. This solution describes the multiple stratification of the pressure field. For the Navier slip condition and for special cases of no-slip and perfect slip conditions, corresponding studies are carried out to determine the number of pressure field stratification zones along the vertical coordinate.

Keywords: layered flow, Oberbeck-Boussinesq system of equations, exact solution, Ostroumov-Birikh class, unidirectional flow, counterflows, Marangoni convection, Navier condition.

References

1. Gershuni G.Z., Zhukhovitskii E.M. *Convective Stability of Incompressible Fluids: Israel Program for Scientific Translations*. Jerusalem, Keter Publishing House, 1976, 330 p.
2. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Fluid Mechanics*, Pergamon Press, Oxford, 1987, 539 p.
3. Aristov S.N., Polyanin A.D. Exact solutions of unsteady three-dimensional Navier-Stokes equations. *Doklady Physics*, 2009, vol. 54, no. 7, pp. 316–321. DOI: 10.1134/S1028335809070039.
4. Polyanin A.D., Aristov S.N. Systems of hydrodynamic type equations: Exact solutions, transformations, and nonlinear stability. *Doklady Physics*, 2009, vol. 54, no. 9, pp. 429–434. DOI: 10.1134/S1028335809090079.
5. 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.
6. Aristov S.N., Pukhnachev V.V. On the Equations of Axisymmetric Motion of a Viscous Incompressible Fluid. *Doklady Physics*, 2004, vol. 49, no. 2, pp. 112–115. DOI: 10.1134/1.1686882.

7. 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.
8. Khan Imad, Hussain Arif, Malik Muhammad Yousaf, Mukhtar Safyan. On magneto-hydrodynamics Prandtl fluid flow in the presence of stratification and heat generation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, vol. 540. DOI: 10.1016/j.physa.2019.123008.
9. Gopal D., Hari Shing Naik S., Kishan N., Raju C.S.K. The impact of thermal stratification and heat generation/absorption on MHD carreau nano fluid flow over a permeable cylinder. *SN Applied Sciences*, 2020, vol. 2, pp. 639. DOI: 10.1007/s42452-020-2445-5.
10. Khan Mair, Malik Muhammad Yousaf, Salahuddin T., Hussain Arif. Change in viscosity of Maxwell fluid flow due to thermal and solutal stratifications. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, vol. 288, pp. 110970. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.110970.
11. Knyazev D.V., Kolpakov I.Y. The exact solutions of the problem of a viscous fluid flow in a cylindrical domain with varying radius. *Rus. J. Nonlin. Dyn.*, 2015, vol. 11, no. 1, pp. 89–97. DOI: 10.20537/nd1501004. (In Russian).
12. Borzenko E.I., Diakova O.A., Shrager G.R. Studying the slip phenomenon for a viscous fluid flow in a curved channel. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2014, no. 2 (28), pp. 35–44. (In Russian).
13. Aristov S.N., Knyazev D.V. Three-dimensional viscous jet flow with plane free boundaries. *Fluid Dynamics*, 2017, vol. 52, no. 2, pp. 215–218. DOI: 10.1134/S0015462817020053.
14. Birikh R.V., Pukhnachev V.V., Frolovskaya O.A. Convective flow in a horizontal channel with non-Newtonian surface rheology under time-dependent longitudinal temperature gradient. *Fluid Dyn.*, 2015, vol. 50, no. 1, pp. 173–179. DOI: 10.1134/S0015462815010172.
15. Garifullin F.A. Free convection in horizontal liquid layers. *Soros Educational Journal*, 2000, vol. 6, no. 8, pp.108–114. (In Russian).
16. Burmasheva N.V., Prosviryakov E.Yu. An exact solution to the description of a unidirectional Marangoni flow of a viscous incompressible fluid with the Navier boundary condition. Velocity field investigation. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structure*, 2019, iss. 5, pp. 23–39. DOI: 10.17804/2410-9908.2019.5.023-039. Available at: https://www.dream-journal.org/issues/2019-5/2019-5_259.html
17. Burmasheva N.V., Prosviryakov E.Yu. An exact solution for describing the unidirectional Marangoni flow of a viscous incompressible fluid with the Navier boundary condition. Temperature field investigation. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2020, iss. 1, pp. 6–23. DOI: 10.17804/2410-9908.2020.1.006-023. Available at: https://www.dream-journal.org/issues/2020-1/2020-1_278.html
18. Naresh Kumar Nedunuri, Ojjela Odelu, Sastry D.R.V.S.R.K. Effects of double stratification on MHD chemically reacting second-grade fluid through porous medium between two parallel plates. *Heat Transfer-Asian Research*, 2019, vol. 48, no. 8. DOI: 10.1002/htj.21564.
19. Abdul Wahab Hafiz, Zeb Hussan, Bhatti Sara, Nam Yunyoung. Numerical Study for the Effects of Temperature Dependent Viscosity Flow of Non-Newtonian Fluid with Double Stratification. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 708. DOI: 10.3390/app10020708.
20. Burmasheva N.V., Prosviryakov E.Yu. Thermocapillary Convection of a Vertical Swirling Liquid. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2020, vol. 54, no. 1, pp. 230–239. DOI: 10.1134/S0040579519060034.
21. Burmasheva N.V., Larina E.A., Prosviryakov E.Yu. Unidirectional Convective Flows of a Viscous Incompressible Fluid with Slippage in a Closed Layer. In: *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2176, pp. 030023-1–03023-5. DOI: 10.1063/1.5135147.
22. Mosina E.V., Chernyshev I.V. The permeability of two dimensional porous medium of square fibers (cell model). *Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics*, 2017, no. 2 (39), pp. 56–64. DOI: 10.15688/jvolsu1.2017.2.5. (In Russian).

23. Gorshkov A.V., Prosviryakov E.Yu. Analytic solutions of stationary complex convection describing a shear stress field of different signs. *Trudy IMM*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 32–41. DOI: 10.21538/0134-4889-2017-23-2-32-41. (In Russian).
24. Burmasheva N.V., Prosviryakov E.Yu. Convective layered flows of a vertically whirling viscous incompressible fluid. Velocity field investigation. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta-Seriyafiziko-Matematicheskoye Nauki*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 341–360. DOI: 10.14498/vsgtu1670.
25. Privalova V.V., Prosviryakov E.Yu. Steady convective Couette flow for quadratic heating of the lower boundary fluid layer. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 69–79. DOI: 10.20537/nd1801007.
26. Petrov A.G. Exact solution of the Navier–Stokes equations in a fluid layer between the moving parallel plates. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2012, vol. 53, no. 5, pp. 642–646. DOI: 10.1134/S0021894412050021.
27. Kolchanov N.V., Putin G.F. Gravitational convection of magnetic colloid in a horizontal layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 89, pp. 90–101. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.050.
28. Burmasheva N.V., Prosviryakov E.Yu. Exact solution of the Navier-Stokes equations describing spatially inhomogeneous flows of a rotating fluid. *Trudy Instituta matematiki i mekhaniki UrO RAN*, 2020, vol. 26, no. 2 (In Russian). (In print).
29. Gorshkov A.V., Prosviryakov E.Y. Ekman Convective Layer Flow of a Viscous Incompressible Fluid. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 189–195. DOI: 10.1134/S0001433818020081.
30. Privalova V.V., Prosviryakov E.Yu., Simonov M.A. Nonlinear gradient flow of a vertical vortex fluid in a thin layer. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, 2019, vol. 15, no. 3, 271–283. DOI: 10.20537/nd190306.
31. Navier C.L.M.H. *M'emoire sur les lois du mouvement des fluids*. M'em. Acad. Sci. Inst. de France, 1823, vol. 2, no. 6. pp. 389–440.
32. Ostroumov G.A. Free convection under the condition of the internal problem. Washington, NACA Technical Memorandum 1407, National Advisory Committee for Aeronautics, 1958.
33. Birikh R.V. Thermocapillary convection in a horizontal layer of liquid. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1966, no. 7, pp. 43–44. DOI: 10.1007/BF00914697.
34. Marangoni C. *Sull espansione delle gocce di un liquido galleggiante sulla superficie di altro liquid*, Pavia, Tipografia dei fratelli Fusi, 1865.

Подана в журнал: 07.03.2020

УДК 539

DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.061-075

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ТЕЧЕНИЯ МАРАНГОНИ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С ГРАНИЧНЫМ УСЛОВИЕМ НАВЬЕ: ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ

Н. В. Бурмашева^{a)*}, Е. Ю. Просвирыков^{b)}

*Институт машиноведения УрО РАН,
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация*

^{a)}  <https://orcid.org/0000-0003-4711-1894>  nat_burm@mail.ru;

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

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

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

Тел.: +7 (343) 375–35–76; факс: 374–53–30

В статье исследуются свойства поля давления при однонаправленном термокапиллярном течении вязкой несжимаемой жидкости в бесконечном горизонтальном слое заданной толщины. Отличительной особенностью рассматриваемой краевой задачи является учет условия проскальзывания Навье на нижней (твердой) границе слоя вместо классического условия прилипания жидкости к твердой поверхности. При моделировании свойств описанного течения при помощи системы уравнений Обербека–Буссинеска получено ее точное решение, принадлежащее классу Остроумова–Бириха. Гидродинамические поля описываются многочленами. Степень многочлена, описывающего фоновое давление, относительно вертикальной координаты равняется восьми. Горизонтальные (продольные) градиенты давления являются параболическими функциями. Данное решение описывает множественную стратификацию поля давления. Для условия скольжения Навье и для частных случаев условия прилипания и идеального скольжения проведены соответствующие исследования по определению количества зон стратификации поля давления по вертикальной координате.

Ключевые слова: слоистое течение, система уравнений Обербека–Буссинеска, точное решение, класс Остроумова–Бириха, однонаправленное течение, противотечения, конвекция Марангони, условие Навье.

1. Введение

Давление является одним из параметров, входящих в уравнение движения вязкой жидкости (уравнение Навье–Стокса) [1, 2], а следовательно, влияющих на свойства потока этой жидкости. Однако связь между скоростями течения и давлением, определяемую уравнением движения, можно рассматривать и в обратном контексте: каким образом характеристики течения влияют на топологию поля давления [3–6].

Известно, что в полную систему уравнений, описывающих конвективное течение вязкой жидкости, также входят уравнение теплопроводности и закон сохранения массы [1]. Эти три уравнения составляют замкнутую систему уравнений относительно вектора скоростей течения, температуры и давления. При этом все неизвестные функции (за исключением давления) входят, по крайней мере, в два из перечисленных трех уравнений. Это приводит к тому, что фактически поле давления определяется по уже известным значениям скорости течения и температуры. Таким образом, на свойства поля давления оказывают влияние особенности распределения поля скорости и температурного поля [7–15].

В [16, 17] было показано, что при определенном сочетании граничных условий возможно возникновение множественной стратификации поля скорости и температуры [8–10; 18–21]. И число точек стратификации этих полей зависит от конкретных значений управляющих параметров краевой задачи [11, 12, 22–25]. В данной статье исследуется влияние параметров граничных условий на распределение изолиний поля давления в горизонтальном слое [13–15; 26–30] при учете условия проскальзывания Навье [31] на нижней границе рассматриваемого слоя.

2. Постановка задачи и методы решения

Рассматривается установившееся однонаправленное течение вязкой несжимаемой жидкости в горизонтальном слое заданной толщины h (рис. 1). Полагаем, что движение происходит в поле силы тяжести с ускорением свободного падения g . Кроме того, принимаем приближение Обербека–Буссинеска о влиянии температуры жидкости T на ее плотность $\rho = \rho_0(1 - \beta T)$, здесь β – коэффициент объемного расширения жидкости [1, 2].

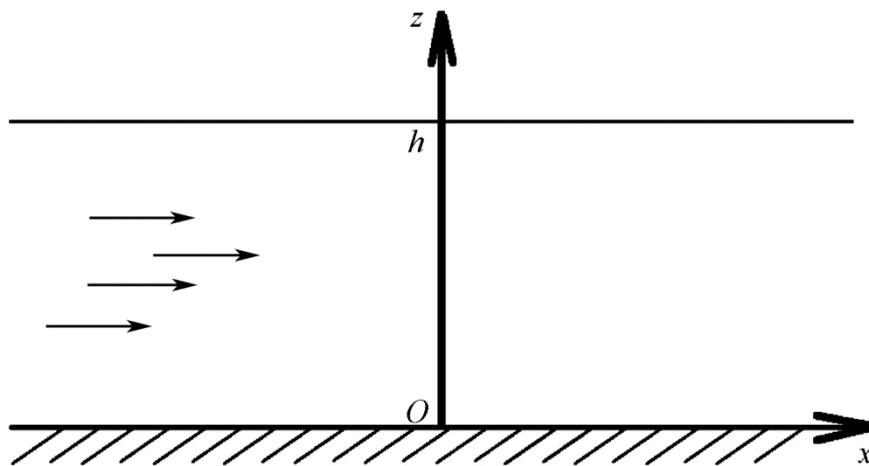


Рис. 1. Геометрия слоя жидкости

Для однонаправленного течения вдоль оси Ox базовая система уравнений тепловой конвекции принимает вид [16, 17, 20, 21, 23–25; 28–30]:

$$\begin{aligned} V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial P}{\partial y} &= 0; \quad \frac{\partial P}{\partial z} = g\beta T; \\ V_x \frac{\partial T}{\partial x} &= \chi \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} &= 0. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь $V_x(x, y, z)$ – скорость течения вдоль выбранного направления; $P(x, y, z)$ – нормированное на плотность отклонение давления от гидростатического; $T(x, y, z)$ – отклонение температуры от отсчетного значения; ν, χ – кинематическая (молекулярная) вязкость и температуропроводность жидкости соответственно. В роли неизвестных в системе (1) выступа-

ют три функции – давление P , температура T и скорость V_x . Отметим, что их число меньше числа уравнений системы (1), т. е. речь идет об исследовании переопределенной системы.

В [16] было исследовано поле скорости течения, профиль которой зависит только от одной (поперечной) координаты, т. е. скорость представима в следующем виде:

$$V_x = U(z). \quad (2)$$

Также в [16] было показано, что если скорость течения имеет структуру (2), то вид решения для поля температуры и поля давления есть двумерные по координатам функции следующего вида:

$$T = T_0(z) + T_1(z)x; \quad P = P_0(z) + P_1(z)x. \quad (3)$$

Точное решение (2) и (3) обобщается в известное семейство Остроумова-Бириха [7, 16, 17, 20, 21, 24, 28, 32, 33].

Структура выражений (2), (3) позволяет преобразовать систему уравнений (1) в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} T_1''' &= 0; \quad P_1' = g\beta T_1; \quad \nu U'' = P_1; \\ \chi T_0'' &= UT_1; \quad P_0' = g\beta T_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь штрихом обозначено дифференцирование по поперечной (вертикальной) переменной z . Общее решение системы (4) для поля давления имеет вид:

$$\begin{aligned} P_1(z) &= \frac{1}{2}gz^2\beta C_1 + gz\beta C_2 + C_3; \\ P_0(z) &= \frac{g^2z^8\beta^2C_1^2}{8064\nu\chi} + \frac{g^2z^7\beta^2C_1C_2}{1008\nu\chi} + \frac{gz^6\beta[g\beta C_2^2 + 3C_1C_3]}{720\nu\chi} + \frac{gz^5\beta[C_2C_3 + 2\nu C_1C_4]}{120\nu\chi} + \\ &+ \frac{gz^4\beta(C_2C_4 + C_1C_5)}{24\chi} + \frac{gz^3\beta C_2C_5}{6\chi} + \frac{1}{2}gz^2\beta C_6 + gz\beta C_7 + C_8. \end{aligned} \quad (5)$$

Также в [16] сформулированы восемь краевых условий для определения значений восьми неизвестных постоянных интегрирования C_1, \dots, C_8 . Эти краевые условия описывают возникновение конвекции Марангони [33, 34] вследствие задания неоднородного источника тепла на верхней границе слоя и учета условия проскальзывания Навье [31] на нижней границе слоя. Математически в силу структуры решений (2) и (3) эти условия записываются в виде следующих соотношений:

$$\begin{aligned} T_0(0) = T_1(0) = 0; \quad T_0(h) = 0; \quad T_1(h) = A; \\ \alpha \frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=0} = U(0); \quad P_0(h) = S_0; \quad P_1(h) = 0; \quad \eta \frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=h} = -\sigma T_1(h). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь σ и η – коэффициенты температурного поверхностного натяжения и динамической вязкости жидкости соответственно; α – длина проскальзывания.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Точное решение краевой задачи

Частное решение системы (4) для компонент поля давления, отвечающее граничным условиям (6), представляет собой набор полиномиальных функций следующего вида:

$$P_1 = \frac{Ag\beta}{2h}(z^2 - h^2);$$

$$P_0 = S_0 - \frac{A^2g\beta\sigma}{120h\eta\chi}(z-h)^2(3h^3 + 2hz(2z+5\alpha) + z^2(2z+5\alpha) + h^2(6z+5\alpha)) +$$

$$+ \frac{A^2g^2\beta^2}{40320h^2\nu\chi}(z-h)^2[183h^6 - 69h^2z^4 + 10hz^5 + 5z^6 +$$

$$+ h^4z(221z+1120\alpha) + h^5(366z+560\alpha) + 4h^3z^2(19z+140\alpha)]. \quad (7)$$

Ранее были достаточно подробно проанализированы точные решения (7) для поля скорости V [16] и поля температуры T [17]. В статье будет проведено исследование свойств точного решения (7), описывающего поле давления P .

Из решения (7) следует, что если продольный градиент температуры $A=0$, то распределение поля давления P оказывается однородным:

$$P|_{A=0} = (P_0(z) + P_1(z)x)|_{A=0} = S_0.$$

Расслоений поля давления при таком задании не возникает, поэтому всюду далее будем полагать, что горизонтальный градиент температуры A отличен от нуля.

Заметим, что продольный градиент давления P_1 в полученном выражении (7) не зависит от длины проскальзывания α и при любом сочетании значений параметров A , β , h не обращается в нуль внутри слоя $(0, h)$, следовательно, отвечающее этому градиенту поле P_1x не имеет точек стратификации.

3.2. Исследование поля давления в случае прилипания жидкости

В случае выполнения условия прилипания жидкости на твердой границе решение (7) для поля давления можно переписать в виде:

$$P_1 = \frac{Ag\beta h}{2}(Z^2 - 1);$$

$$P_0 = S_0 - \frac{A^2g\beta\sigma h^4}{120\eta\chi}(Z-1)^2(3+6Z+4Z^2+2Z^3) +$$

$$+ \frac{A^2g^2\beta^2 h^6}{40320\nu\chi}(Z-1)^2[183+366Z+221Z^2+76Z^3-69Z^4+10Z^5+5Z^6] =$$

$$= S_0 - \frac{A^2g\beta\sigma h^4}{120\eta\chi} f_1(Z) + \frac{A^2g^2\beta^2 h^6}{40320\nu\chi} f_2(Z). \quad (8)$$

В формулах (8) введена безразмерная координата $Z = z/h \in [0, 1]$. Фоновое давление P_0 определяется взаимодействием постоянного однородного давления, термокапиллярного и термогравитационного слагаемых. При варьировании толщины слоя h постоянное давление S_0 будет

вносить преобладающий вклад в фоновое давление P_0 . На рис. 2 представлены профили функций $f_1(Z)$ и $f_2(Z)$, входящих в состав выражения (8) для фонового давления.

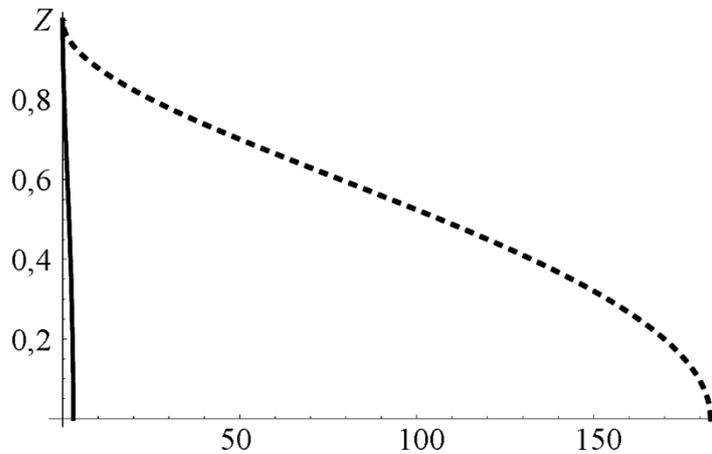


Рис. 2. Профили вспомогательных функций $f_1(Z) = (Z - 1)^2 (3 + 6Z + 4Z^2 + 2Z^3)$ (сплошная линия) и $f_2(Z) = (Z - 1)^2 [183 + 366Z + 221Z^2 + 76Z^3 - 69Z^4 + 10Z^5 + 5Z^6]$ (пунктирная линия)

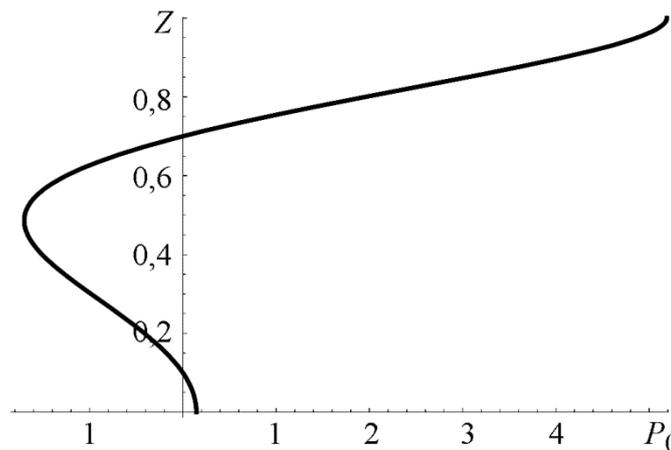


Рис. 3. Профиль фонового давления P_0 в случае прилипания жидкости:

$$\text{при } S_0 = 5,188 \text{ Н/м}^2; \frac{A^2 g \beta \sigma h^4}{120 \eta \chi} = 62,681 \text{ Н/м}^2; \frac{A^2 g^2 \beta^2 h^6}{40320 \nu \chi} = 1 \text{ Н/м}^2$$

Поскольку функции $f_1(Z)$ и $f_2(Z)$ принимают строго положительные значения внутри рассматриваемого слоя, а параметр S_0 отвечает атмосферному давлению, на основании структуры выражения (8) можно сделать вывод, что фоновое давление P_0 не может иметь нулевых точек внутри слоя, если жидкость является аномальной ($\sigma < 0$). Другими словами, стратификация поля P_0 возможна только для ньютоновских жидкостей.

Функции $f_1(Z)$ и $f_2(Z)$ строго монотонны на отрезке $[0,1]$, а значит, по аналогии с подходом, использованным в [16] при оценке числа застойных точек поля скорости течения, можно утверждать, что число нулевых точек поля давления P_0 не превосходит двух. Профиль фонового давления для этого случая представлен на рис. 3.

Заметим, что картина распределения линий уровня поля давления P при наличии двух нулевых точек у фонового давления P_0 зависит помимо прочего от величины коэффициента $Ag\beta h/2$, определяющего продольный градиент давления P_1 (рис. 4 и 5).

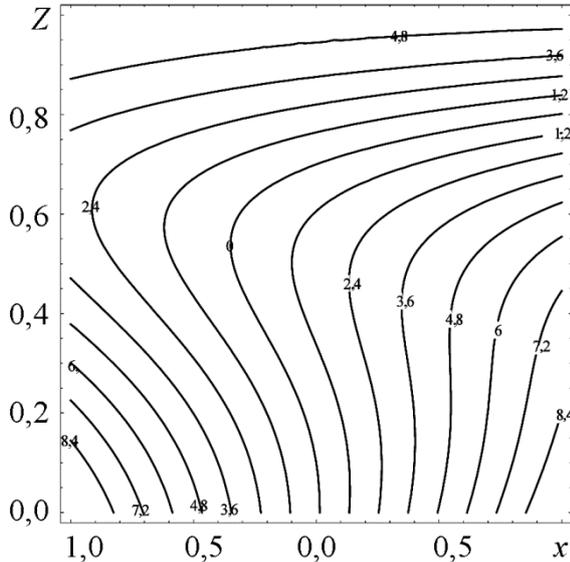


Рис. 4. Линии уровня поля давления в случае прилипания:

$$\text{при } S_0 = 5,188; \frac{A^2 g \beta \sigma h^4}{120 \eta \chi} = 62,681;$$

$$\frac{A^2 g^2 \beta^2 h^6}{40320 \nu \chi} = 1; \frac{Ag\beta h}{2} = 10$$

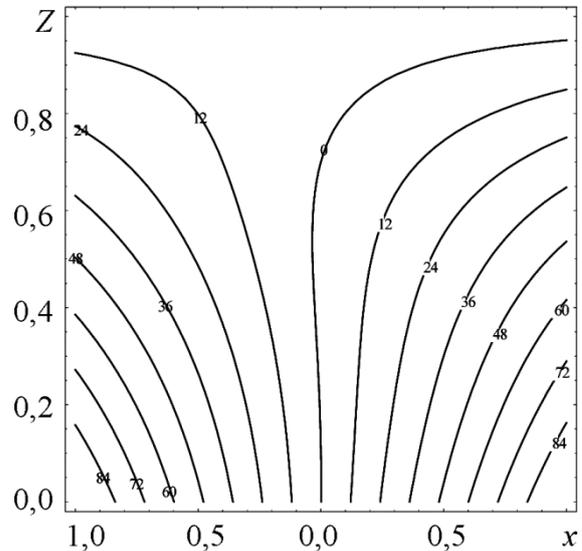


Рис. 5. Линии уровня поля давления в случае прилипания:

$$\text{при } S_0 = 5,188; \frac{A^2 g \beta \sigma h^4}{120 \eta \chi} = 62,681;$$

$$\frac{A^2 g^2 \beta^2 h^6}{40320 \nu \chi} = 1; \frac{Ag\beta h}{2} = 100$$

Рис. 4 и 5 наглядно демонстрируют, что число нулевых точек поля давления меняется в зависимости от удаленности выбранного среза от сечения $x = 0$.

3.3. Исследование поля давления в случае проскальзывания жидкости

Рассмотрим теперь, какой вклад вносят слагаемые в выражении (7), содержащие длину скольжения α . Для этого представим точное решение (7) в следующем виде:

$$P_0 = S_0 - \frac{A^2 g \beta \sigma h^4}{120 \eta \chi} (Z-1)^2 (3 + 6Z + 4Z^2 + 2Z^3) +$$

$$+ \frac{A^2 g^2 \beta^2 h^6}{40320 \nu \chi} (Z-1)^2 [183 + 366Z + 221Z^2 + 76Z^3 - 69Z^4 + 10Z^5 + 5Z^6] +$$

$$+ \left(-5 \frac{A^2 g \beta \sigma h^3}{120 \eta \chi} + 560 \frac{A^2 g^2 \beta^2 h^2}{40320 \nu \chi} \right) (Z^2 - 1)^2 \alpha. \quad (9)$$

Отметим, что в отличие от анализа выражения (8) сказать что-либо о природе жидкости (ньютоновская/аномальная) на основе решения (9) уже не представляется возможным.

Кроме того, коэффициент $\left(-5 \frac{A^2 g \beta \sigma h^3}{120 \eta \chi} + 560 \frac{A^2 g^2 \beta^2 h^2}{40320 \nu \chi}\right)$ при дополнительном слагаемом в выражении (9) оказался связан с коэффициентами $\frac{A^2 g \beta \sigma h^3}{120 \eta \chi}$ и $\frac{A^2 g^2 \beta^2 h^2}{40320 \nu \chi}$, стоящими перед функциями $f_1(Z)$ и $f_2(Z)$ в точных решениях (8) и (9). Поэтому, несмотря на появление дополнительного независимого положительного параметра α , число нулевых точек многочлена (9) также не превосходит двух. Соответствующий профиль приведен на рис. 6.

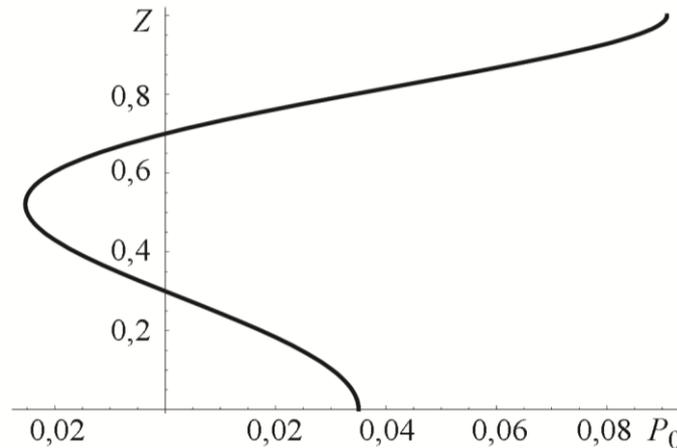


Рис. 6. Профиль фонового давления P_0 в случае выполнения условия Навье: при $S_0 = 0,00097 \text{ Н/м}^2$; $\frac{A^2 g \beta \sigma h^4}{120 \eta \chi} = 1 \text{ Н/м}^2$; $\frac{A^2 g^2 \beta^2 h^6}{40320 \nu \chi} = 0,01069 \text{ Н/м}^2$; $\alpha = 1 \text{ м}$

3.4. Исследование поля давления в случае идеального скольжения

Если длина скольжения $\alpha = \infty$, то условие Навье изменит вид – вместо выражения

$$\alpha \frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=0} = U(0),$$

входящего в группу краевых условий (6), получим (в силу предельного перехода) условие следующего вида:

$$\frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0. \tag{10}$$

В [17] было получено точное решение для фоновой температуры T_0 в случае идеального скольжения:

$$T_0 = \frac{A^2 g \beta h^3}{5040 \nu \chi} [5Z^7 - 63Z^5 + 63Z^3 - 5Z]. \tag{11}$$

Подставим далее выражение (11) в последнее уравнение системы (4)

$$P_0' = g\beta T_0 = \frac{A^2 g^2 \beta^2 h^3}{5040\nu\chi} [5Z^7 - 63Z^5 + 63Z^3 - 5Z]$$

и проинтегрируем его. В результате получим точное решение для фонового давления P_0 :

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{A^2 g^2 \beta^2 h^3}{5040\nu\chi} \left[\frac{5}{8} Z^8 - \frac{63}{6} Z^6 + \frac{63}{4} Z^4 - \frac{5}{2} Z^2 \right] + C_1 = \\ &= \frac{A^2 g^2 \beta^2 h^3}{40320\nu\chi} [5Z^8 - 84Z^6 + 126Z^4 - 20Z^2] + C_1. \end{aligned} \quad (12)$$

Для определения константы C_1 воспользуемся граничным условием $P_0(z=h) = S_0$, которое в результате замены z на Z примет вид:

$$P_0(Z=1) = S_0.$$

Подставив в это условие решение (12), получим:

$$S_0 = \frac{A^2 g^2 \beta^2 h^3}{40320\nu\chi} [5 - 84 + 126 - 20] + C_1 = \frac{27A^2 g^2 \beta^2 h^3}{40320\nu\chi} + C_1,$$

откуда находим, что $C_1 = S_0 - \frac{27A^2 g^2 \beta^2 h^3}{40320\nu\chi}$. Следовательно, выражение для фонового давления в случае идеального скольжения жидкости имеет вид:

$$P_0 = S_0 - \frac{A^2 g^2 \beta^2 h^3}{40320\nu\chi} [5Z^8 - 84Z^6 + 126Z^4 - 20Z^2 - 27]. \quad (13)$$

Отметим, что функция $g(Z) = 5Z^8 - 84Z^6 + 126Z^4 - 20Z^2 - 27$, входящая в выражение (13), не имеет нулей на интервале $(0,1)$, но при этом не является монотонной (имеет на данном интервале одну точку экстремума – точку $Z_g = 0,2947155529756107$) (рис. 7).

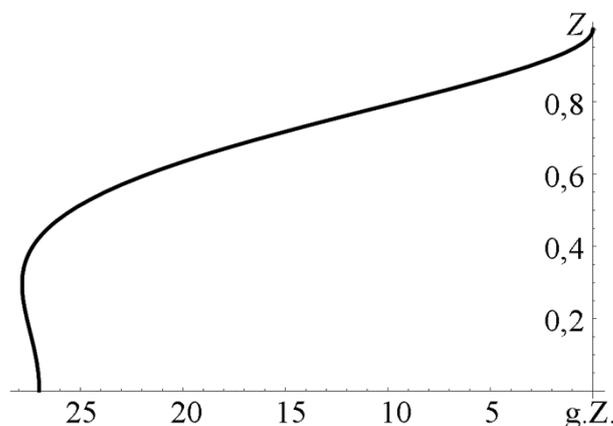


Рис. 7. Профиль функции $g(Z)$

Следовательно, у фонового давления (13) могут быть две нулевые точки внутри рассматриваемого слоя (0,1), причем обе эти точки находятся в окрестности точки Z_g (рис. 8).

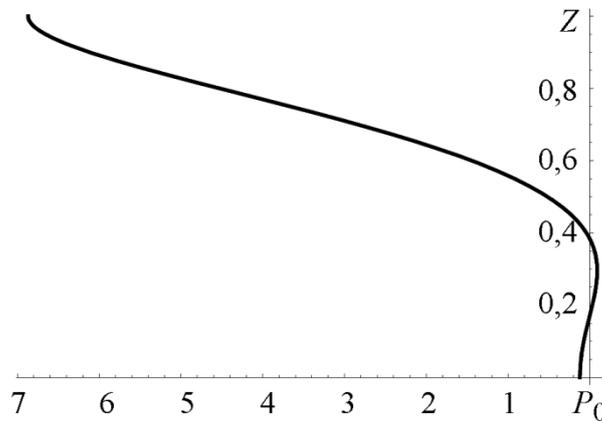


Рис. 8. Профиль фонового давления P_0 в случае идеального скольжения жидкости:

$$\text{при } S_0 = -6,87; \frac{A^2 g^2 \beta^2 h^3}{40320 \nu \chi} = 0,25$$

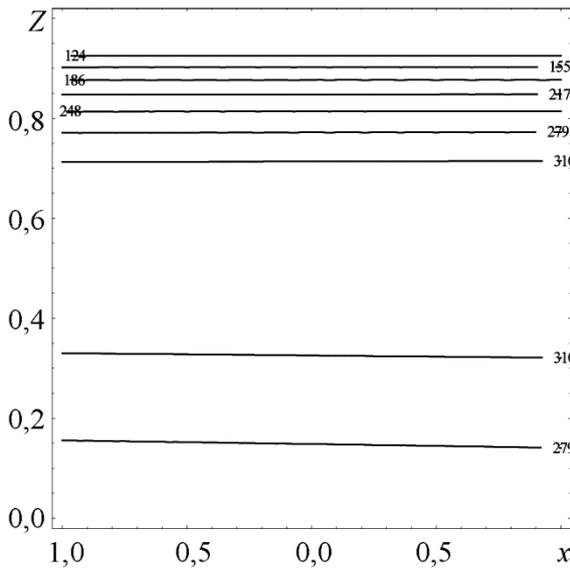


Рис. 9. Изолинии поля давления P при $S_0 = 1; b_1 = 1; b_2 = 10$

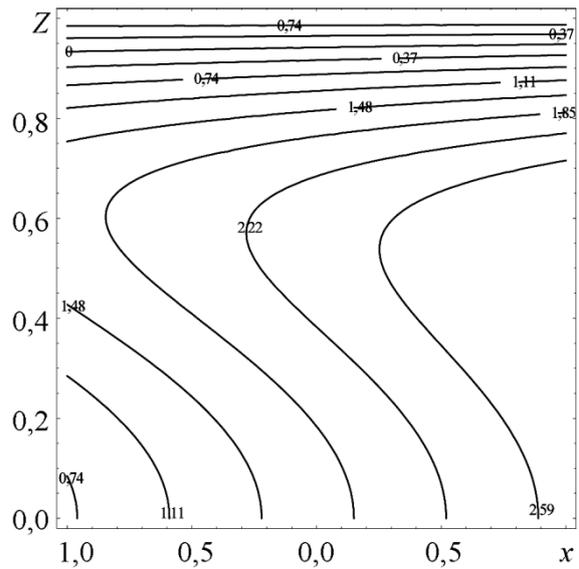


Рис. 10. Изолинии поля давления P при $S_0 = 1; b_1 = 1; b_2 = 0,1$

Заметим, что стратификация фонового давления P_0 на три зоны возможная для любой жидкости. Используя соотношения (8) и (13), легко находим выражение для итогового поля давления P :

$$\begin{aligned}
 P &= P_0 + P_1 x = S_0 - \frac{A^2 g^2 \beta^2 h^3}{40320 \nu \chi} [5Z^8 - 84Z^6 + 126Z^4 - 20Z^2 - 27] + \frac{Ag\beta h}{2} (Z^2 - 1)x = \\
 &= S_0 - \frac{A^2 g^2 \beta^2 h^3}{40320 \nu \chi} (Z^2 - 1)(5Z^4 - 74Z^2 - 27) + \frac{Ag\beta h}{2} (Z^2 - 1)x =
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

$$= S_0 - \frac{Ag\beta h}{2}(Z^2 - 1) \left[\frac{Ag\beta h^2}{20160\nu\chi}(5Z^4 - 74Z^2 - 27) - x \right].$$

Из формулы (14) следует, что распределение изолиний поля давления зависит от величины параметра S_0 и коэффициентов $b_1 = Ag\beta h/2$, $b_2 = Ag\beta h^2/(20160\nu\chi)$ (рис. 9–11).

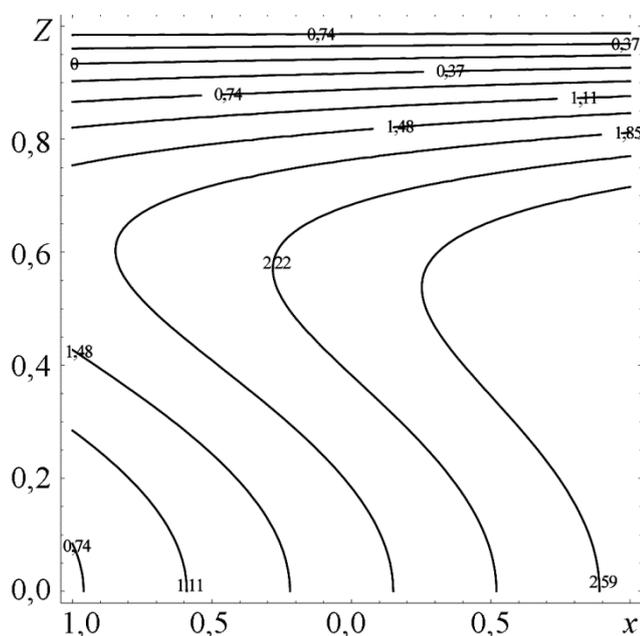


Рис. 11. Изолинии поля давления P при $S_0 = 1$; $b_1 = 1$; $b_2 = 0,01$

Отметим, что изменение порядка величины коэффициентов b_1 , b_2 возможно за счет выбора жидкости, за счет изменения параметра нагрева границ и за счет варьирования толщины слоя жидкости.

4. Заключение

В статье предложено точное решение системы уравнений Обербека–Буссинеска, описывающее однонаправленное течение вязкой несжимаемой жидкости в горизонтальном слое, индуцированное учетом термокапиллярного эффекта и условия проскальзывания Навье. Основное внимание в статье было уделено изучению свойств поля давления. Показано, что независимо от величины длины скольжения фоновая температура может стратифицироваться на три зоны относительно отсчетного значения. Однако положение точек стратификации зависит от физических свойств жидкости и от значений параметров, определяющих краевую задачу.

Литература

1. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная неустойчивость несжимаемой жидкости. – М. : Наука, 1972. – 532 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. – 6-е изд. – М. : Физматлит, 2006. – 736 с.
3. Aristov S. N., Polyaniin A. D. Exact solutions of unsteady three-dimensional navier-stokes equations // Doklady Physics. – 2009. – Vol. 54, no. 7. – P. 316–321. – DOI: 10.1134/S1028335809070039.

4. Polyanin A. D., Aristov S. N. Systems of hydrodynamic type equations: Exact solutions, transformations, and nonlinear stability // *Doklady Physics*. – 2009. – Vol. 54, no. 9. – P. 429–434. – DOI: 10.1134/S1028335809090079.
5. 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. – P. 642–662. – DOI: 10.1134/S0040579509050066.
6. Aristov S. N., Pukhnachev V. V. On the Equations of Axisymmetric Motion of a Viscous Incompressible Fluid // *Doklady Physics*. – 2004. – Vol. 49, no. 2. – P. 112–115. – DOI: 10.1134/1.1686882.
7. 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. – P. 286–293. – DOI: 10.1134/S0040579516030027.
8. On magnetohydrodynamics Prandtl fluid flow in the presence of stratification and heat generation / Imad Khan, Arif Hussain, Muhammad Yousaf Malik, Safyan Mukhtar // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2019. – Vol. 540. – DOI: 10.1016/j.physa.2019.123008.
9. The impact of thermal stratification and heat generation/absorption on MHD carreau nano fluid flow over a permeable cylinder / D. Gopal, S. Hari Shing Naik, N. Kishan, C. S. K. Raju // *SN Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 2. – P. 639. – DOI: 10.1007/s42452-020-2445-5.
10. Change in viscosity of Maxwell fluid flow due to thermal and solutal stratifications / Mair Khan, Muhammad Yousaf Malik, T. Salahuddin, Arif Hussain // *Journal of Molecular Liquids*. – 2019. – Vol. 288. – P. 110970. – DOI: 10.1016/j.molliq.2019.110970.
11. Князев Д. В., Колпаков И. Ю. Точные решения задачи о течении вязкой жидкости в цилиндрической области с меняющимся радиусом // *Нелинейная динамика*. – 2015. – Т. 11, № 1. – С. 89–97. – DOI: 10.20537/nd1501004.
12. Борзенко Е. И., Дьякова О. А., Шрагер Г. Р. Исследование явления проскальзывания в случае течения вязкой жидкости в изогнутом канале // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. – 2014. – № 2 (28). – С. 35–44.
13. Aristov S. N., Knyazev D. V. Three-dimensional viscous jet flow with plane free boundaries // *Fluid Dynamics*. – 2017. – Vol. 52, no. 2. – P. 215–218. – DOI: 10.1134/S0015462817020053.
14. Бирих Р. В., Пухначев В. В., Фроловская О. А. Конвективное течение в горизонтальном канале с неньютоновской реологией поверхности при нестационарном продольном градиенте температуры // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. – 2015. – № 1. – С. 192–198.
15. Гарифуллин Ф. А. Возникновение конвекции в горизонтальных слоях жидкости // *Соросовский образовательный журнал*. – 2000. – Т. 6, № 8. – С. 108–114.
16. Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Yu. An exact solution to the description of a unidirectional Marangoni flow of a viscous incompressible fluid with the Navier boundary condition. Velocity field investigation // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2019. – Iss. 5. – P. 23–39. – DOI: 10.17804/2410-9908.2019.5.023-039. – URL: https://www.dream-journal.org/issues/2019-5/2019-5_259.html
17. Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Yu. An exact solution for describing the unidirectional Marangoni flow of a viscous incompressible fluid with the Navier boundary condition. Temperature field investigation // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2020. – Iss. 1. – P. 6–23. – DOI: 10.17804/2410-9908.2020.1.006-023. – URL: https://www.dream-journal.org/issues/2020-1/2020-1_278.html
18. Nedunuri Naresh Kumar, Ojjela Odelu, Sastry D. R. V. S. R. K. Effects of double stratification on MHD chemically reacting second-grade fluid through porous medium between two parallel plates // *Heat Transfer-Asian Research*. – 2019. – Vol. 48, no. 8. – DOI: 10.1002/htj.21564.

19. Numerical Study for the Effects of Temperature Dependent Viscosity Flow of Non-Newtonian Fluid with Double Stratification / Hafiz Abdul Wahab, Hussan Zeb, Sara Bhatti, Yunyoung Nam // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10, no. 2. – P. 708. – DOI: 10.3390/app10020708.
20. Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Yu. Thermocapillary Convection of a Vertical Swirling Liquid // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2020. – Vol. 54, no. 1. – P. 230–239. – DOI: 10.1134/S0040579519060034.
21. Burmasheva N. V., Larina E. A., Prosviryakov E. Yu. Unidirectional Convective Flows of a Viscous Incompressible Fluid with Slippage in a Closed Layer // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2176. – P. 030023-1–03023-5. – DOI: 10.1063/1.5135147.
22. Мосина Е. В., Чернышев И. В. Проницаемость двумерной пористой среды из волокон квадратного сечения (ячеечная модель) // *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1. Математика. Физика*. – 2017. – № 2 (39). – С. 56–64. – DOI: 10.15688/jvolsu1.2017.2.5.
23. Горшков А. В., Просвирыков Е. Ю. Аналитические решения стационарной сложной конвекции, описывающие поле касательных напряжений разного знака // *Труды ИММ*. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 32–41. – DOI: 10.21538/0134-4889-2017-23-2-32-41.
24. Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Yu. Convective layered flows of a vertically whirling viscous incompressible fluid. Velocity field investigation // *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta-Seriyafiziko-Matematicheskiye Nauki*. – 2019. – Vol. 23, no. 2. – P. 341–360. – DOI: 10.14498/vsgtu1670.
25. Privalova V. V., Prosviryakov E. Yu. Steady convective Couette flow for quadratic heating of the lower boundary fluid layer // *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. – 2018. – Vol. 14, no. 1. – P. 69–79. – DOI: 10.20537/nd1801007.
26. Petrov A. G. Exact solution of the Navier–Stokes equations in a fluid layer between the moving parallel plates // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2012. – Vol. 53, no. 5. – P. 642–646. – DOI: 10.1134/S0021894412050021.
27. Kolchanov N. V., Putin G. F. Gravitational convection of magnetic colloid in a horizontal layer // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – Vol. 89. – P. 90–101. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.050.
28. 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, № 2. (Принято в печать).
29. Gorshkov A. V., Prosviryakov E. Y. Ekman Convective Layer Flow of a Viscous Incompressible Fluid // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2018. – Vol. 54, no. 2. – P. 189–195. – DOI: 10.1134/S0001433818020081.
30. Privalova V. V., Prosviryakov E. Yu., Simonov M. A. Nonlinear gradient flow of a vertical vortex fluid in a thin layer // *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. – 2019. – Vol. 15, no. 3. – P. 271–283. – DOI: <https://doi.org/10.20537/nd190306>.
31. Navier C. L. M. H. M'emoire sur les lois du mouvement des fluides // *M'ém. Acad. Sci. Inst. de France*. – 1823. – Vol. 2, no. 6. – С. 389–440.
32. Остроумов Г. А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. – М. : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1952. – 256 с.
33. Birikh R. V. Thermocapillary convection in a horizontal layer of liquid. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1966, no. 7, pp. 43–44. – DOI: 10.1007/BF00914697.
34. Marangoni C. Sull espansione delle gocce di un liquido galleggiante sulla superficie di altro liquid. – Pavia : Tipografia dei fratelli Fusi, 1865.