

Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 1 (11), май, 2022

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования
«Барановичский государственный университет».

Адрес редакции:
ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.
Телефон: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Подписные индексы: 00999 — для индивидуальных подписчиков; 009992 — для организаций.
Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ» серия «Технические науки» включён в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам.

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.

Выходит на русском, белорусском и английском языках.
Распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской группой А. Ю. Сидоренко
Технический редактор Л. Н. Щербук
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 04.05.2022. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага ксероксная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 8,60.
Тираж 100 экз. Заказ . Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: Гродненское областное унитарное полиграфическое предприятие «Слонимская типография».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/203 от 07.03.2014, № 2 от 25.02.2014. Адрес: ул. Хлопина, 16, 231800 г. Слоним, Гродненская обл.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кочурко В. И. (гл. ред. журн.), доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, заслуженный работник образования Республики Беларусь, профессор кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Климук В. В. (зам. гл. ред. журн.), кандидат экономических наук, доцент, первый проректор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Алифанов А. В. (гл. ред. сер.), лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Горбач Ю. Е. (отв. секретарь сер.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Зубрицкая Л. С. (ред. текстов на англ. яз.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Богданович И. А. (отв. за направление «Машиностроение и машиноведение»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Дубень И. В.** (отв. за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Г. И., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь);

Белый А. В., академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Девойно О. Г.**, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий (филиал Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть», Минск, Республика Беларусь);

Дремук В. А., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Жигалов А. Н.**, доктор технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Калугин Ю. К.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Республика Беларусь); **Карташевич А. Н.**, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь); **Клочков А. В.**, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь);

Клубович В. В., академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Сиваченко Л. А.**, доктор технических наук, профессор (межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», Могилев, Республика Беларусь); **Томило В. А.**, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь); **Шелег В. К.**, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь).

Promoter: Educational Institution
"Baranovichi State University".

Editorial address:
21 Voykova Str., 225404 Baranovichi.
Phone: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Subscription indices: 00999 — for individual subscribers;
009992 — for companies.
The certificate of the registration of mass media № 1533
of 30.07.2012 issued by the Ministry of Information
of Belarus.

In compliance with the order of the Higher Attestation
Commission of the Republic of Belarus from January 21,
2015 № 16 the scientific and practical journal "BarSU
Herald. Engineering Series" is included into the List of
scientific publications of the Republic of Belarus for
publishing the results of theses research on engineering
sciences (mechanical engineering and machines,
processes and machines of agroengineering systems).

Scientific-and-practical journal "BarSU Herald"
is included into RSCI (Russian Science Citation Index),
license agreement № 06-01/2016.

Issued in Russian, Belorussian and English. The journal is
distributed on the territory of the Republic of Belarus.

Managing editor A. Y. Sidorenko
Technical editor L. N. Scherbuk
Desktop Publishing S. M. Glushak
Proofreader N. N. Kolodko

Signed print 04.05.2022. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 13,25.
Acc.-pub. s. l. 8,60. Circulation of 100 copies.
Order . Free price.

Printing performance: Grodno Regional Printing Unitary
Enterprise "Slonim printing establishment". The state
registration certificate of the publisher, manufacturer and
publications distributor № 1/203 of 07.03.2014, № 2
of 25.02.2014. Address: 16 Hlyupin St., 231800 Slonim,
Grodno region.

EDITORIAL BOARD

Kochurko V. I. (*editor-in-chief*), DSc in Agriculture, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus, Professor of Department of Technical Support of Agricultural Production Processes and Agronomic Sciences (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Klimuk V. V. (*deputy editor-in-chief*), PhD in Economics, Associate Professor, first vice-rector (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Alifanov A. V. (*the series editor-in-chief*), Laureate of the State Prize of the Republic of Belarus in the field of science and technology, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Gorbach Yu. E. (*responsible for the topic area "Engineering Sciences"*) (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Zubritskaya L. S. (*ed. of texts in English*) (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Bogdanovich I. A. (*responsible for the area "Mechanical Engineering and Machine Science"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Duben I. V.** (*responsible for the area "Processes and Machines of Agro engineering Systems"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Aniskovich G. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Belarusian State Agrarian Technical University", Minsk, the Republic of Belarus); **Bely A. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Devoino O. G.**, DSc in Technical Sciences, Professor, Head of the Innovative Research Laboratory of Plasma and Laser Technologies (branch of the Belarusian National Technical University "Research Unit", Minsk, the Republic of Belarus); **Dremuk V. A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Zhigalov A. N.**, DSc in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Kalugin Yu. K.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Yanka Kupala Grodno State University", Grodno, the Republic of Belarus); **Kartashevich A. N.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klochov A. V.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klubovich V. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Sivachenko L. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", Mogilev, the Republic of Belarus); **Tomilo V. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus); **Sheleg V. K.**, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus).

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Громыко П. Н., Хатетовский С. Н., Макацария Д. Ю., Макаревич А. С. Обеспечение поступательного движения сателлита при работе эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов

Жигалов А. Н., Горавский И. А. Экспериментальные исследования микроструктуры быстрорежущей стали P6M5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом

Малеронко В. В., Кушнеров А. В., Алифанов А. В. Влияние магнитно-импульсной обработки на фазовые переходы в поверхностном слое режущего осевого инструмента из инструментальной стали

Налиуко А. І., Русан С. І., Сівачэнка Л. А., Сівачэнка Т. Л. Методика набліжаного аналізу сілавога ўзаемадзеяння ў здрабняльных машынах са шчоткападобнымі звёнамі

Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Корольков А. С. Исследование эксплуатационных показателей синтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях легковых автомобилей

Фадин Ю. М., Шеметова О. М. Использование пневмосмесительного оборудования для производства сухих строительных смесей

Шматов А. А. Характер упрочнения твердых сплавов при термогидрохимической обработке

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Бондарев С. Н. Определение потребной мощности на процесс машинного доения коровы

Китун А. В., Передня В. И., Крупенин П. Ю., Филатов В. Г., Дубень И. В. Исследование процесса измельчения кормов плоскостным роторным измельчающим аппаратом вертикального типа

Китун А. В., Передня В. И., Крупенин П. Ю., Филатов В. Г., Дубень И. В. Оптимизация выбора оборудования линии первичной обработки молока

Китун А. В., Швед И. М. Определение параметров участка размыва осадка в навозохранилище направленным действием струи жидкого навоза

Пузевич К. Л., Коцуба В. И., Пузевич В. В., Филиппов А. И. Агрегаты для посева сельскохозяйственных культур под мульчирующую пленку

Шаршунов В. А., Курзенков С. В., Левчук В. А., Цайц М. В. Исследование характера деформации и разрушения семенной коробочки льна

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

4 Gromyko P. N., Khatetovsky S. N., Makatsaryia D. Yu., Makarevich A. S. Provision of the satellite translational motion during the operation of eccentric transmission with parallel arrangement of input and output shafts

14 Jigalov A. N., Goravskii I. A. Experimental investigations of the high-speed steel P6M5 microstructure hardened by the aerodynamic sound method

24 Maleronok V. V., Kushnerou A. V., Alifanov A. V. The effect of magnetic pulse processing on phase transitions in the surface layer of a cutting axial tool of tool steel

31 Naliuko O. I., Rusan S. I., Sivachenko L. A., Sivachenko T. L. Method of approximate analysis of force interaction in grinding machines with brush-like links

37 Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Korolkov A. S. Research of performance of synthetic motor oils indicators used in gasoline engines of passenger cars

43 Fadin Yu. M., Shemetova O. M. The use of pneumatic mixing equipment for the dry building mixes production

48 Shmatov A. A. The nature of hard alloys hardening during thermo-hydrochemical treatment

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

55 Bondarev S. N. Determination of the required power for the machine cow milking process

65 Kitun A. V., Perednya V. I., Krupenin P. Y., Filatov V. G., Duben I. V. Research of grinding feed process by a planar vertical rotary grinder

74 Kitun A. V., Perednya V. I., Krupenin P. Y., Filatov V. G., Duben I. V. Optimization of the equipment choice for a primary milk processing line

81 Kitun A. V., Shved I. M. Determination of the sediment erosion area parameters in the manure storage by the directed action of a liquid manure jet

88 Puzevich K. L., Kotsuba V. I., Puzevich V. V., Filippov A. I. Aggregates for sowing agricultural crops under mulching film

96 Sharshunov V. A., Kurzenkov S. V., Levchuk V. A., Tsaits M. V. Investigation of the nature of flax seedpods deformation and destruction

УДК 538.911; 549.086; 621.373

В. В. Малеронок¹, А. В. Кушнеров²,**А. В. Алифанов³**, доктор технических наук, профессор¹Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации», ул. Уборевича, 77, 220096 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 561 28 88, s-tm.v.v@mail.ru²Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», ул. Академическая, 12, 220072 Минск, Республика Беларусь, v_kukareko@mail.ru³Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, alifanov_aav@mail.ru

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ РЕЖУЩЕГО ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ

Исследовалось влияние магнитно-импульсной обработки осевого режущего инструмента из инструментальных сталей Р6М5 и Х6ВМФ на их структуру, фазовый состав и микротвердость. Обнаружено аномально высокое содержание остаточного аустенита в режущей кромке сверла из стали Х6ВМФ. Показано, что в результате магнитно-импульсной обработки сверла из стали Х6ВМФ количество остаточного аустенита в режущей кромке уменьшилось от $V_\gamma = 78\%$ до $V_\gamma = 62\%$, а микротвердость поверхности увеличилась от 550 до 830 HV 0,025. Установлено, что магнитно-импульсная обработка сверл из стали Р6М5 приводит к незначительному уменьшению количества остаточного аустенита в режущей кромке сверла и увеличению микротвердости кромки от 660 до 750 HV 0,01. Установлено, что наложение магнитного поля в процессе магнитно-импульсной обработки сталей приводит к смещению температуры начала мартенситного превращения, что сопровождается снижением количества аустенитной фазы в сталях и увеличением их микротвердости. Воздействие давления магнитного поля на поверхность обрабатываемого инструмента приводит к деформации обрабатываемого материала, что также может сопровождаться эффектом деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и упрочнением стали.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка; сверло; остаточный аустенит; фазовые переходы; микротвердость; режущий инструмент; сталь Р6М5; сталь Х6ВМФ.

Рис. 2. Табл. 2. Библиогр.: 16 назв.

V. V. Maleronok¹, A. V. Kushnerou²,**A. V. Alifanov³**, DSc in Technical Sciences, Professor¹Educational Institution "Belarusian State Aviation Academy", 77 Uborevicha Str., 220096 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (29) 561 28 88, s-tm.v.v@mail.ru²State Scientific Institution "Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus", 12 Akademicheskaya Str., 220072 Minsk, the Republic of Belarus, v_kukareko@mail.ru³Educational Institution "Baranovichi State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, alifanov_aav@mail.ru

THE EFFECT OF MAGNETIC PULSE PROCESSING ON PHASE TRANSITIONS IN THE SURFACE LAYER OF A CUTTING AXIAL TOOL OF TOOL STEEL

The effect of magnetic pulse processing of axial cutting tools made of tool steels P6M5 ($W \approx 6\%$; $Mo \approx 5\%$) and X6VMF ($Cr \approx 6\%$; $W \approx 1\%$; $Mo \approx 1\%$; $V \approx 1\%$) on their structure, phase composition and microhardness were studied. An abnormally high content of residual austenite in the cutting edge of the drill made of steel X6VMF was found. It is shown that as a result of magnetic pulse processing of a drill made of steel X6VMF, the amount of residual austenite in the cutting edge decreased from $V_\gamma = 78\%$ to $V_\gamma = 62\%$, and the microhardness of the surface increased from 550 to 830 HV 0.025. It is established that MPP of drills made of P6M5 steel leads to a slight decrease for austenite in the cutting edge of the drill and an increase in the microhardness of the edge from 660 to 750 HV 0.01. It is established that the superposition of a magnetic field during the magnetic pulse processing of steels leads to a shift in the temperature in the beginning of the martensitic transformation, which is accompanied by a decrease in the austenitic

phase amount in the steels and an increase in their microhardness. In addition, the effect of magnetic field pressure on the surface of the processed tool leads to deformation of the processed material, which can also be accompanied by the effect of deformation-activated $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation of steel hardening.

Key words: magnetic pulse processing; drill; residual austenite; phase transitions; microhardness; cutting tool; R6M5 steel; X6BMФ steel.

Fig. 2. Table 2. Ref.: 16 titles.

Введение. Среди применяющегося в промышленности Республики Беларусь металло- и деревообрабатывающего инструмента следует выделить осевой режущий инструмент из быстрорежущей стали (сверла, фрезы, метчики, развертки и т. д.), отличающийся повышенной износостойкостью режущих кромок, но при действии ударных нагрузок подверженный выкрашиванию и разрушению. Широкое распространение также получил инструмент из стали повышенной износостойкости, легированной вольфрамом, молибденом и ванадием (например, сталь X6BMФ). На территории Республики Беларусь производство осевого режущего инструмента ограничено предприятием ОАО «Оршанский инструментальный завод», а большинство импортного инструмента поставляется из России, Китая и Германии. При этом качество и технологичность изготовления импортного инструмента зачастую не соответствует ГОСТам (по химическому составу, твердости, проценту остаточного аустенита, шероховатости и баллу зернистости, стойкости и т. д.). В связи с этим актуальной проблемой является повышение эксплуатационных показателей всей номенклатуры режущего инструмента на стадии производства либо финишная обработка готовых изделий перед эксплуатацией. При этом возможно применение методов поверхностного упрочнения готовых изделий, основанных на нанесении соответствующих покрытий или физико-химическом модифицировании поверхностного слоя, направленных на повышение прочности и износостойкости инструмента [1—4]. Кроме того, наряду с известными способами упрочнения режущего инструмента (термическая, термомеханическая, химико-термическая обработка) все более широкое распространение получают инновационные методы поверхностной обработки: напыление защитных покрытий, электроискровое, лазерное, электронно-лучевое и магнитно-импульсное упрочнение [5—9]. Одним из перспективных методов упрочняющей обработки готовых изделий является магнитно-импульсная обработка (далее — МИО), которая обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами: низкая себестоимость обработки, сохранение геометрии обработанных изделий, отсутствие расходных материалов и дополнительных агрессивных сред, простота технологической оснастки и экологическая чистота [8; 9].

Материалы и методы исследования. Для проведения МИО использованы партии закаленных сверл двух диаметров: 10 мм («Томский инструмент»), изготовленные из быстрорежущей стали Р6М5; 20 мм («Туламаш»), изготовленные из стали повышенной износостойкости типа X6BMФ. На исследуемых сверлах определялся их химический состав с использованием оптико-эмиссионного спектрометра Spectro.

Химический состав образцов сверл диаметром 10 и 20 мм представлен в таблице 1, где также приведен химический состав стандартной быстрорежущей стали Р6М5 в соответствии с ГОСТ 19265-73 [10].

Согласно данным таблицы 1, партия сверл диаметром 10 мм по большинству элементов соответствовала показателям ГОСТа стали Р6М5. Сверла диаметром 20 мм соответствовали вольфрам-молибденовой стали повышенной износостойкости типа X6BMФ [11].

Магнитно-импульсная обработка сверл проводилась на установке МИУ-3 (с увеличенной конденсаторной батареей) серией импульсов (по 7 импульсов в серии; энергия импульса составляла 10 кДж). Измерение микротвердости проводилось методом Виккерса на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор 10 и 25 г.

Т а б л и ц а 1. — Химический состав образцов сверла

Химический элемент	Образец		
	Р6М5 (ГОСТ 19265)	Р6М5 (сверло Ø10 мм)	Х6ВМФ (сверло Ø20 мм)
C	0,82...0,90	0,89	1,20
Si	0,20...0,50	0,36	1,69
Mn	0,20...0,50	0,24	0,32
Ni	До 0,60	0,32	0,19
S	До 0,025	0,023	0,01
P	До 0,03	0,03	0,02
Cr	3,80...4,40	3,52	5,14
Mo	4,80...5,30	5,53	1,05
W	5,50...6,50	5,27	1,44
V	1,70...2,10	1,70	0,69
Co	До 0,50	0,32	—
Cu	До 0,25	0,23	0,10
Fe	От 75,00	81,80	88,83

Рентгеноструктурный анализ образцов сверл проводился на дифрактометре POWDIX 600 в монохроматизированном кобальтовом ($\text{CoK}\alpha$) излучении ($\lambda = 0,178897$ нм). Рентгеновская съемка осуществлялась в фокусировке по Брэггу—Брентано в непрерывном режиме со скоростью 0,01 град / с при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Для расшифровки фазового состава использовалась картотека стандартных спектров PDF-2. При обработке данных рентгеноструктурного анализа использовались программы автоматизированного программного комплекса Crystallographica Search-Match и HighScore Plus Demo. Определение количества остаточного аустенита проводилось с помощью расчетов интегральной площади дифракционных линии 110 от α -Fe и линии 111 от γ -Fe.

Результаты исследования и их обсуждение. Проводилось исследование микротвердости сверл, изготовленных из стали Х6ВМФ (\varnothing 20 мм) и стали Р6М5 (\varnothing 10 мм), а также определение фазового состава сверл в состоянии поставки и после различных циклов МИО.

В исходном состоянии режущий инструмент из стали Р6М5 (\varnothing 10 мм) содержит мартенсит (α -Fe), аустенит (γ -Fe) и карбиды вольфрама (рисунок 1, а). Содержание аустенитной фазы в поверхностном слое режущей кромки $V_\gamma = 26$ %, что согласуется с литературными данными для термообработанной закаленной стали Р6М5 [12]. В центральной части сверла содержание остаточного аустенита не превышало 15 %.

В состоянии поставки сверло из стали Х6ВМФ имело микротвердость сердцевины 730 HV 0,025, а микротвердость режущей кромки составляла 550 HV 0,025. Фазовый состав сверла \varnothing 20 мм из стали Х6ВМФ включает в себя мартенсит (α -Fe) и аустенит (γ -Fe). При этом содержание аустенитной фазы в сердцевине сверла \varnothing 20 мм составляло 15 %, а в поверхностном слое режущей кромки сверла $V_\gamma = 78$ % (см. рисунок 1, б). Пониженная твердость и аномально высокое содержание аустенита в режущей кромке сверла \varnothing 20 мм связано, по-видимому, с нарушением технологии механической шлифовки сверла — образованием прижогов.

После серии циклов МИО сверл (7 импульсов, 10 кДж) количество остаточного аустенита в их режущих кромках существенно снижается (см. рисунок 1, в, г). В частности, для сверла \varnothing 10 мм содержание аустенитной фазы уменьшается до $V_\gamma = 23$ %, а для сверла \varnothing 20 мм V_γ уменьшается до 62 %. При этом в стали Р6М5 существенно возрастает микротвердость.

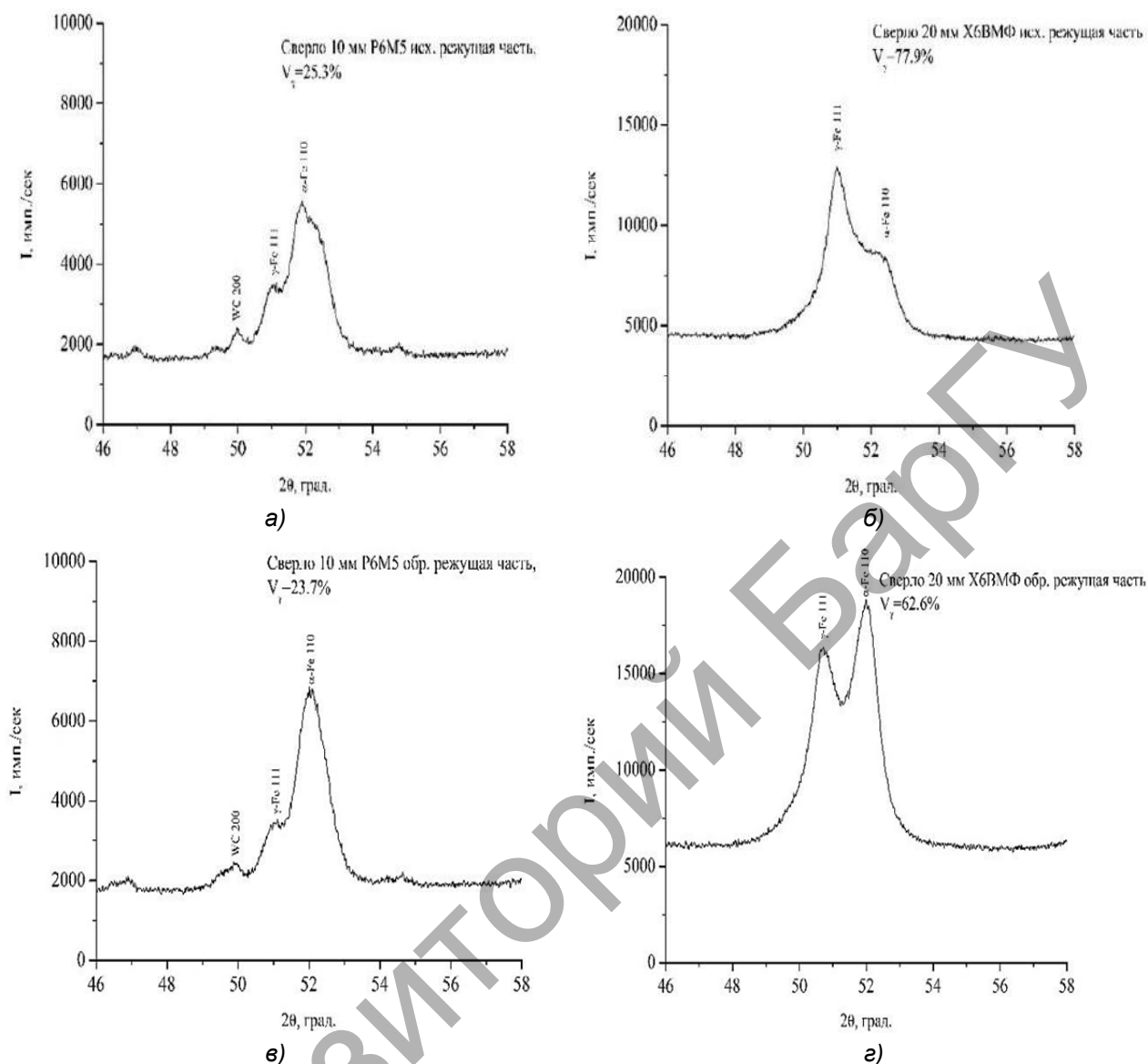
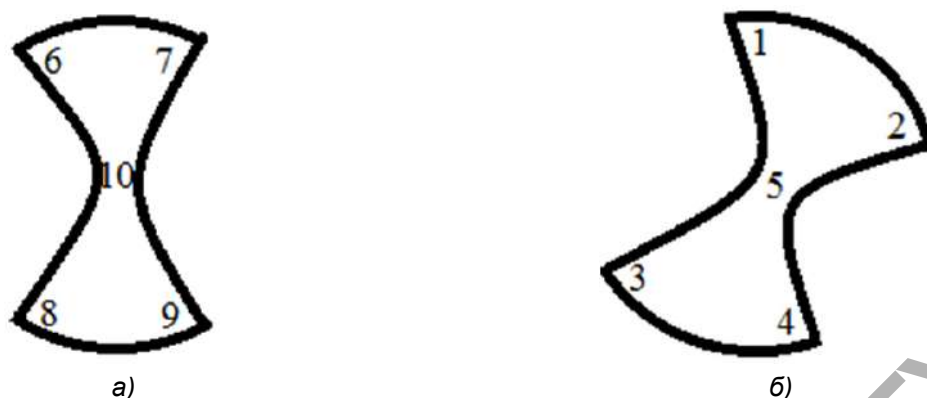


Рисунок 1. — Рентгеновские дифракционные линии от аустенитной фазы в режущей части сверла: а — исходного диаметром 10 мм; б — исходного диаметром 20 мм; в — обработанного (7 импульсов, 10 кДж) диаметром 10 мм; г — обработанного (7 импульсов, 10 кДж) диаметром 20 мм

Измерение микротвердости сверла выполнялось по пяти контрольным точкам (рисунок 2). Результаты измерения представлены в таблице 2. Микротвердость сверла в исходном состоянии изменяется от 630 до 710 HV 0,01, а средняя микротвердость по всему сечению режущего инструмента составляет 660 HV 0,01. После применения МИО микротвердость стали Р6М5 возрастает до уровня 750 HV 0,01. В стали Х6ВМФ микротвердость поверхности возрастает до уровня 830...850 HV 0,025. Таким образом, эффективность от применения МИО в большей степени характерна для партии сверл с исходно повышенным количеством аустенитной фазы. Вместе с тем высокий уровень микротвердости обработанной МИО стали Х6ВМФ может быть вызван как фазовым $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением, так и дополнительным упрочнением поверхности сверла вследствие деформации его поверхностного слоя под действием давления, вызванного взаимодействием импульсного магнитного поля, создаваемого внешним источником, с током, индуцируемым этим полем в обрабатываемой детали [13].



1, 4, 6, 9 — ленточка (режущая кромка); 2, 3, 7, 8 — спинка; 5, 10 — канавка

Рисунок 2. — Контрольные точки измерения микротвердости на исходном (а) и обработанном (б) шлифе сверла (Ø 10 мм) из стали Р6М5

Т а б л и ц а 2. — Значения микротвердости образцов сверл (10 мм) из стали Р6М5

Образец	Точка измерения	HV 0,01
Обработанный	1	820
	2	670
	3	800
	4	700
	5	800
	Среднее значение	750
Исходный	6	670
	7	650
	8	650
	9	630
	10	710
	Среднее значение	660

Обнаруженное явление фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения при МИО связано с двумя причинами. Как показано в работах [14; 15], наложение магнитного поля приводит к смещению температуры фазового равновесия ΔT , которое выражается уравнением Кривоглаза—Садовского:

$$\Delta T = T_0 \frac{\Delta M \Delta H}{q}, \quad (1)$$

где ΔT — смещение температуры начала мартенситного превращения (M_n);

T_0 — температура равенства (фазового равновесия) свободных энергий мартенсита и аустенита;

ΔM — разность магнитных моментов мартенсита и аустенита;

ΔH — прирост напряженности магнитного поля H ;

q — теплота $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения.

Таким образом, наложение магнитного поля расширяет температурную область существования ферромагнитной фазы и смещает температуры T_0 и M_n , что приводит к дополнительному превращению аустенита в мартенсит [15].

Результаты расчетов из работы [15] показывают, что смещение температур T_0 , M_n в постоянных магнитных полях низкой напряженности составляет $7 \div 10$ °С. В сверхсильных и импульсных магнитных полях сдвиг температуры равновесия может составлять $30 \dots 60$ °С, что должно приводить к существенному уменьшению количества остаточного аустенита в инструментальных сталях.

Таким образом, обнаруженное явление фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения при МИО связано со смещением температуры начала мартенситного превращения M_n [14; 15], а также с деформацией поверхности обрабатываемого материала, что также может сопровождаться эффектом деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и упрочнением стали [16].

Интересно отметить, что проведение МИО сталей сопровождается сдвигом дифракционных линий от матричных α - и γ -фаз в сторону меньших углов рассеяния (см. рисунок 1). Указанное явление может быть связано с появлением сжимающих напряжений в поверхностном слое обработанных МИО изделий вследствие деформации поверхностного слоя сталей при протекании в них мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. Формирование сжимающих напряжений в поверхностных слоях сталей приводит к увеличению сопротивления зарождению и распространению микротрещин при трении и циклическом нагружении материала [13].

Полученные результаты свидетельствуют о комплексном воздействии МИО: за счет создаваемого давления на близкие ко внутренней поверхности индуктора точки сверла (см. рисунок 2: 1, 4 — ленточка; 2, 3 — спинка), а также вследствие тепловых эффектов (разогрева сверла) на участках с цилиндрической формой, удобных для протекания индукционных токов (5 — канавка).

Таким образом, при МИО изделий с повышенным содержанием аустенитной фазы важную роль играет проведение одной серии импульсов (количество импульсов, величина энергии обработки), позволяющей создать расчетные термодинамические условия обработки. Например, для диаметров сверл $10 \dots 20$ мм серия МИО представляет собой порядка 7 импульсов с энергией обработки 10 кДж.

Заключение. Исследовано влияние МИО осевого режущего инструмента из инструментальных сталей Р6М5 и Х6ВМФ на содержание в них остаточного аустенита и на микротвердость режущей части сверла. Установлено, что для стали Х6ВМФ количество аустенитной фазы железа уменьшается от 78 до 62 %. При этом микротвердость увеличилась от 550 до $830 \dots 850$ HV 0,025.

Показано, что обработка импульсным магнитным полем сверла из стали Р6М5 приводит к незначительному уменьшению процента остаточного аустенита с 26 до 23 %. В то же время микротвердость (среднее значение) увеличилась на 14 %.

Установлено, что наложение магнитного поля приводит к сдвигу температур фазового равновесия и начала мартенситного превращения, что вызывает существенное уменьшение количества остаточного аустенита в инструментальных сталях. Взаимодействие импульсного магнитного поля, создаваемого внешним источником, с током, индуцируемым этим полем в обрабатываемой детали, приводит к деформации поверхностного слоя под действием давления, что также сопровождается эффектом деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и упрочнением α -фазы.

Указанные результаты позволяют сделать вывод, что МИО характеризуется комплексным воздействием на обрабатываемый инструмент.

Список цитированных источников

1. Верещака, А. С. Некоторые тенденции развития технологической производственной среды / А. С. Верещака // СТІН. — 2009. — № 8. — С. 12—19 ; № 9. — С. 9—14.
2. Шадуя, В. Л. Современные методы обработки материалов в машиностроении : учеб. пособие / В. Л. Шадуя. — Минск : Техноперспектива, 2008. — 314 с.

3. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А. Г. Бойцов [и др.]. — М. : Машиностроение, 1991. — 144 с.
4. Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 3—5 окт. 2007 г. : в 2 ч. / редкол.: С. А. Астапчик [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, М-во промышленности Респ. Беларусь, Гос. ком. по науке и технологиям Респ. Беларусь. — Минск : Экоперспектива, 2007. — Ч. 1. — 204 с.
5. Гитлевич, А. Е. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, Н. Я. Парканский. — Кишинев : Штиница, 1985. — 196 с.
6. Технология нанесения покрытий на основе карбида титана ЭИО деталей с СВС-реагентами / О. П. Репут [и др.] // Литье и металлургия. — 2007. — № 1 (41). — С. 145—153.
7. Акимов, В. В. Повышение свойств быстрорежущей стали для режущего инструмента / В. В. Акимов, П. В. Петунин, О. Ю. Бургонова // Машиностроение и материаловедение. — 2014. — № 2. — С. 27—30.
8. Орлов, А. С. Повышение работоспособности режущих инструментов путем упрочнения импульсной магнитной обработкой : дис. ... канд. техн. наук : 25.05.12 / А. С. Орлов. — Иваново, 2012. — 185 л.
9. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // Литье и металлургия. — 2012. — № 3. — С. 77—82.
10. Прутки и полосы из быстрорежущей стали : ГОСТ 19265-73. — Введ. 10.12.73. — М. : Изд-во стандартов, 1973. — 22 с.
11. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. — М. : Металлургия, 1983. — 527 с.
12. Гуляев, А. П. Металловедение : учеб. для вузов / А. П. Гуляев. — 6-е изд., перераб. и доп. — М. : Металлургия, 1986. — 544 с.
13. Алифанов, А. В. Магнитно-импульсная обработка стальных изделий / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Цианенко // Перспективные материалы и технологии. — Витебск : Изд-во ВГТУ. — 2013. — Гл. 25. — С. 520—543.
14. Садовский, В. Д. Остаточный аустенит в закаленной стали / В. Д. Садовский, Е. А. Фокина. — М. : Наука, 1986. — 112 с.
15. Природа влияния магнитных полей на температуру начала мартенситного превращения в сплавах железа / В. М. Счастливцев [и др.] // Физика твердого тела. — 2016. — Т. 58, вып. 2. — С. 327—335.
16. Бланк, В. Д. Фазовые превращения в твердых телах при высоком давлении / В. Д. Бланк, Э. И. Эстрин. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 412 с.

Поступила в редакцию 25.03.2022.