

Вестник БарГУ

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 1 (9), июнь, 2021

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: vestnik@barsu.by .

Подписные индексы: 00993 — для индивидуальных
подписчиков; 009932 — 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 опублико-
вания 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 и английском языках.
Распространяется на территории
Республики Беларусь.

Исполняющий обязанности заведующего
редакционно-издательской группой Н. Н. Колодко
Технический редактор Л. Н. Щербук
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 31.05.2021. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага ксероксная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 10,75. Уч.-изд. л. 6,60.
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. Хлюпина, 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,
ректор учреждения образования «Барановичский государственный университет»
(Барановичи, Республика Беларусь).

Климук В. В. (*зам. гл. ред. журн.*), кандидат экономических наук, доцент,
проректор по научной работе учреждения 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
(Барановичи, Республика Беларусь); Горбач Ю. Е. (*отв. секретарь сер.*)
(Барановичи, Республика Беларусь).

Леон О. В. (*ред. текстов на англ. яз.*), кандидат филологических наук
(Барановичи, Республика Беларусь).

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

Анискович Г. И., кандидат технических наук, доцент (Минск, Республика
Беларусь); Белый А. В., член-корреспондент Национальной академии наук
Беларуси, доктор технических наук, профессор (Минск, Республика Бела-
русь); Гавриленя А. К., кандидат технических наук, доцент (Барановичи,
Республика Беларусь); Девойно О. Г., доктор технических наук, профессор
(Минск, Республика Беларусь); Дремук В. А., кандидат технических наук
(Барановичи, Республика Беларусь); Ивашко В. С., доктор технических наук,
профессор (Минск, Республика Беларусь); Калугин Ю. К., кандидат
технических наук, доцент (Гродно, Республика Беларусь); Карташевич А. Н.,
доктор технических наук, профессор (Горки, Республика Беларусь);
Клочков А. В., доктор технических наук, профессор (Горки, Республика
Беларусь); Клубович В. В., доктор технических наук, академик
Национальной академии наук Беларуси, профессор (Минск, Республика
Беларусь); Сиваченко Л. А., доктор технических наук, профессор (Могилев,
Республика Беларусь); Томило В. А., доктор технических наук, профессор
(Минск, Республика Беларусь); Шелег В. К., член-корреспондент
Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук,
профессор (Минск, Республика Беларусь).

BarSU Herald

A quarterly scientific and practical journal

Published since March 2013
It is published 2 times a year

1 (9), March, 2021

Engineering Series

Promoter: educational institution "Baranovichy State University".

Editorial address:
21 Voykova Str., 225404 Baranovichy.
Phone: +375 (163) 45 46 28.
E-mail: vestnik@barsu.by .

Subscription indices: 00993 — for individual subscribers;
009932 — 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 and English. The journal is distributed
on the territory of the Republic of Belarus.

Interim managing editor N. N. Kolodko
Technical editor L. N. Scherbuk
Desktop Publishing S. M. Glushak
Proofreader N. N. Kolodko

Signed print 31.05.2021. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 10,75.
Acc.-pub. s. l. 6,60. 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*), Doctor of Agriculture, Professor, Member of the Belarusian Academy of Engineering, Member of the International Academy of Technical Education, Member of the International Academy of Pedagogical Education, Member of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Distinguished educator of the Republic of Belarus (Baranovichy, the Republic of Belarus).

Klimuk V. V. (*Deputy Editor-in-Chief*), Ph. D. in Economic Sciences, Associate Professor, (Baranovichy, the Republic of Belarus).

Alifanov A. V. (*Executive Editor of the Issue*), State-Prize Winner of the Republic of Belarus in Science and Technology, Doctor of Technical Sciences, Professor (Baranovichy, the Republic of Belarus).

Leon O. V., Ph. D in Philological Science (Baranovichy, the Republic of Belarus).

Bogdanovich I. A. (*in charge of the heading "Machine Building and Engineering Science"*), Ph. D of Technical Science, Associate Professor (Baranovichy, the Republic of Belarus); Duben I. V. (*in charge of the heading "Processes and Machines of Agro-engineering Systems"*), Ph. D. in Technical Sciences (Baranovichy, the Republic of Belarus).

Aniskovich G. I., Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, the Republic of Belarus); Bely A. V., A. M. of the National Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus); Gavrilena A. K., Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichy, the Republic of Belarus); Devoino O. G., Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus); Dremuk V. A., Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichy, the Republic of Belarus); Ivashko V. S., Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus); Kalugin Y. K., Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Grodno, the Republic of Belarus); Kartashevich A. N., Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus); Klochkov A. V., Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus); Klubovich V. V., Doctor of Technical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor (Minsk, the Republic of Belarus); Sivachenko L. A., Doctor of Technical Sciences, Professor (Mogilev, the Republic of Belarus); Tomilo V. A., Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus); Sheleh V. K., A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Дударев В. А., Михальков А. Д., Михальков В. С., Сиваченко Л. А.** Исследование работы вертикальной вибрационной мельницы для измельчения строительных материалов
- Клочков А. В., Емельяненко А. А., Федосов К. С.** Параметры индукции при объемном расположении магнитов
- Милукова А. М., Матяс А. Н., Лях А. А., Горчанин А. И., Толкачева О. А., Хан Цзинь.** Исследование физико-механических свойств титанового сплава после магнитно-импульсной обработки
- Попок Н. Н., Портянко С. А., Тихон Е. М., Анисимов В. С.** Моделирование и регулирование стружкообразования и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды при фрезеровании
- Потапов В. А., Сиваченко Л. А., Дремук В. А.** Исследование влияния режимов работы цепного агрегата на показатели процесса измельчения мела в технологии производства извести
- Романчук И. А., Голубев В. С., Вегера И. И.** Особенности формирования упрочняющих покрытий при комплексной лазерной и плазменно-порошковой наплавке

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

- Бурдейко В. А., Ловкис В. Б.** Расчет щеток машины для сбора колорадского жука
- Зяц П. В., Казакевич П. П.** Результаты экспериментальных исследований машины для сбора колорадского жука
- Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Заболотный О. Д.** Исследование вязкостно-температурных показателей полусинтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях механических транспортных средств
- Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Заболотный О. Д.** Исследование эксплуатационных показателей полусинтетических моторных масел марки SAE 10W40, используемых в бензиновых двигателях

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

- 4 Dudarev V. A., Mikhalkov A. D., Mikhalkov V. S., Sivachenko L. A.** Investigation of the operation of a vertical vibration mill for grinding building materials
- 10 Klochkov A. V., Emelianenko A. A., Fedosov K. S.** Induction parameters by the three-dimensional arrangement of magnets
- 18 Milyukova A. M., Matyas A. N., Liakh A. A., Gorchanin A. I., Tolkacheva O. A., Han Jin.** Improvement of physical and mechanical properties of titanium alloy by magnetic-pulse treatment
- 27 Popok N. N., Partsianka S. A., Tikhon E. M., Anisimov V. S.** Modeling and regulation of chip formation and flows of the lubricating and cooling process medium during milling
- 37 Potapov V. A., Sivachenko L. A., Dremuk V. A.** Research of the influence of the operating modes of the chain unit on the indicators of the process of grinding chalk in the technology of lime production
- 44 Romanchuk I. A., Golubev V. S., Vegera I. I.** Features of forming of consolidating coverages at complex laser and plasma-powder surfacing

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

- 53 Burdejko V. A., Lovkis V. B.** Calculation of the brushes of the colorado beetle harvesting machine
- 59 Zayats P. V., Kazakevich P. P.** Results of experimental studies colorado beetle harvesting machines
- 70 Pivovarchik A. A., Gavrilenia A. K., Zabolotny O. D.** Study of viscosity-temperature indices of semi-synthetic engine oils used in gasoline engines of power-driven vehicles
- 77 Pivovarchik A. A., Gavrilenia A. K., Zabolotny O. D.** Performance study of semi-synthetic SAE 10W40 engine oils used in gasoline engines

УДК 621.98.044.7

А. М. Милюкова¹, А. Н. Матяс¹, А. А. Лях¹, А. И. Горчанин¹, О. А. Толкачева¹, Хан Цзинь²
¹Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 267 60 10
²Пекинский институт авиационных материалов, пр-т Авиационных материалов, 8, 100095 Пекин, Китайская Народная Республика, priemnaya@phti.by, annart@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПОСЛЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Проведены исследования физико-механических свойств титанового сплава (температура, твердость, остаточные напряжения) после магнитно-импульсной обработки при различных режимах. Показано, что магнитно-импульсное воздействие при определенных оптимальных режимах позволяет улучшить физико-механические свойства исследуемого сплава.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка; энергия; импульс; упрочнение; физико-механические свойства.

Рис. 6. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

А. М. Milyukova¹, А. N. Matyas¹, А. А. Liakh¹, А. I. Gorchanin¹, О. А. Tolkacheva¹, Han Jin²
¹State Scientific Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”,
10 Kuprevich Str., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 267 60 10,
²Beijing institute of Aviation materials, 8 Aviation materials Ave., 100095 Beijing, China,
priemnaya@phti.by, annart@mail.ru

IMPROVEMENT OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY BY MAGNETIC-PULSE TREATMENT

Strength properties were studied (temperature, hardness, residual stresses) after magnetic-pulse treatment under various conditions. It is shown that the magnetic-pulse effect under certain optimal conditions can improve the physical-mechanical properties of the studied alloy.

Key words: magnetic pulse processing; energy; impulse; hardening; physical and mechanical properties; microstructure.

Fig. 6. Table 1. Ref.: 7 titles.

Введение. Целью работы является исследование и определение параметров воздействия сильного импульсного магнитного поля (далее — ИМП), обеспечивающих улучшение физико-механических свойств титанового сплава ТС4 (Ti-6Al-4V).

Механические свойства металлических сплавов определяются химическим составом материала, твердостью, микротвердостью, структурными и фазовыми превращениями, величиной, знаком и глубиной остаточных напряжений, деформацией кристаллической решетки.

Учеными и специалистами Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси (ФТИ, Минск) и Барановичского государственного университета (БарГУ, Барановичи) успешно развивается новое для Республики Беларусь научное направление — магнитно-импульсная упрочняющая обработка (далее — МИО) поверхностей изделий из стали и сплавов. При воздействии МИО на стали устраняются дефекты в их кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла в поверхностном слое, что снижает трещинообразование, стабилизи-

рует структуру, обеспечивает повышение прочности изделий и, соответственно, увеличивает их срок эксплуатации [1].

Уже накоплен достаточный экспериментальный и научный опыт применения сильного импульсного электромагнитного поля для повышения периода работоспособности различных изделий (инструментов), применяемых в дерево- и металлообрабатывающей, машиностроительной, авиаремонтной и пищевой отраслях промышленности как на предприятиях Республики Беларусь, так и за рубежом [2; 3].

К упрочнению поверхности стальных изделий под воздействием электромагнитного импульса приводят поверхностные деформации, уплотнение структуры вблизи поверхности, а также фазовые превращения аустенита в мартенсит, миграции примесей вблизи границ зерен, возникновение мелкодисперсной структуры на поверхности, связанное с образованием новых границ между зернами и дроблением пластинок цементита [3—5]. Эти процессы связаны с неоднородностью материала стали и локальным выделением теплоты вблизи границ зерен, а также в местах различных дефектов при протекании индукционных токов, а также магнитострикционными эффектами (в случае изделий, выполненных из магнитных сталей) [3].

В случае с титановыми сплавами, которые имеют низкую удельную электропроводность и не имеют магнитных фаз, эти эффекты неочевидны, изменения свойств менее заметны. Структура и свойства поверхностного слоя должны изменяться под воздействием образующегося давления.

Известно, что при исследовании предела текучести у большинства титановых сплавов его приходится измерять условно по заданной остаточной деформации ($\sigma_{0,1}$ или $\sigma_{0,2}$), так как «физический» предел текучести, или «зуб текучести», на диаграмме растяжения редко выявляется. Сопrotивление малым пластическим деформациям (предел текучести, предел пропорциональности и предел упругости) у титановых сплавов оказывается очень чувствительным к микроструктуре (величине зерна) и скорости нагружения. Титан уже при комнатной температуре имеет ползучесть при напряжениях, заметно более низких, чем предел текучести. Известно, что у титана выявлена заметная разница между пределами пропорциональности и упругости, причем определяемый предел упругости в отличие от стали бывает всегда ниже предела пропорциональности, который является более устойчивой величиной. В связи с этим весьма затруднительно определение таких свойств, как предел пропорциональности и упругости.

На механические свойства титановых сплавов существенное влияние оказывают присутствующие основные и легирующие элементы, а также технологические примеси (O_2 , N_2 , H_2). O_2 и N_2 являются элементами внедрения и сильнейшими упрочнителями: каждая десятая доля процента кислорода повышает прочность примерно на 130 МПа, а азот действует еще сильнее, однако при этом они снижают пластичность и вязкость, придавая хрупкость титановому сплаву [6].

Материалы и методы исследования. Титан относится к парамагнетикам — материалам, имеющим слабую проводимость электрического тока, теплопроводность при 20 °С 8,37 Вт / (м · град) и низкую магнитную проницаемость. Он не притягивается к магниту, как железо, и не выталкивается, как медь. Эти свойства титановых сплавов должны снижать их восприимчивость к МИО.

Исследования физико-механических свойств титанового сплава (температура, твердость, остаточные напряжения) после МИО при различных режимах проводили следующим образом. Экспериментальные образцы титанового сплава TC4 (Ti-6Al-4V), применяемого для производства лопаток авиадвигателя, изготовлены из прутка по комплексной технологии, включающей механическую и термическую обработку, и имеют диаметр 20 мм с параллельными плоскостями по бокам (рисунок 1, а). Из образцов изготовили шлифы (см. рисунок 1, б) для исследования механических свойств при различных технологических режимах МИО.

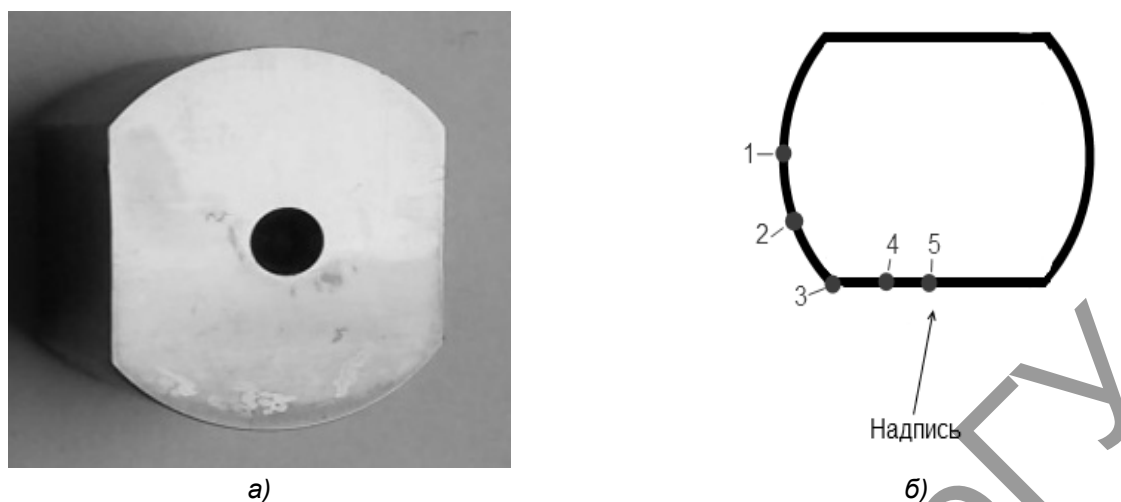


Рисунок 1. — Экспериментальный образец сплава ТС4: а — внешний вид шлифа; б — схема измерения микротвердости *HV* шлифованных образцов из титанового сплава ТС4

Исследуемые образцы диаметром 20 мм изготовлены в виде шлифов, полированных на одной поверхности. Для надежного измерения твердости две противоположные боковые поверхности срезаны и выполнены параллельными. На одной из них нанесена надпись — маркировка образца.

Образцы сплава ТС4 для осуществления МИО располагали в ИМП, создаваемом в цилиндрическом индукторе (рисунок 2) таким образом, чтобы линии индукции были перпендикулярны полированной стороне образца и пронизывали ее. Геометрия ИМП не изменялась во всех экспериментах.

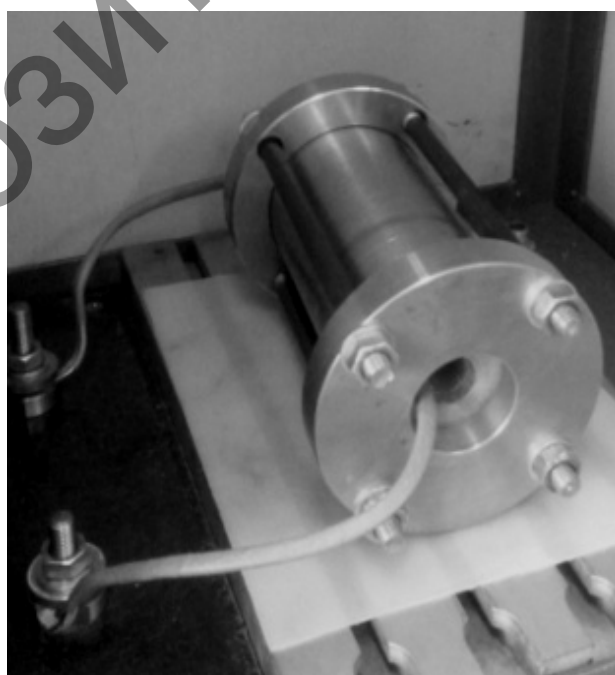


Рисунок 2. — Индуктор цилиндрический для МИО цилиндрических образцов и изделий

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты исследований до и после МИО некоторых свойств образцов сплава ТС4 представлены в таблице 1.

Анализ данных, представленных в таблице 1, показал, что начальная твердость *HRC* поверхности образцов составила в среднем 30...34, после МИО она не изменилась.

После проведения МИО образцов ТС4 на установке МИУ-3 с низкой частотой воздействия при разных технологических режимах с энергией воздействия от 8 до 13 кДж после извлечения из индуктора зафиксировано максимальное повышение температуры поверхности образца Т8 до 60 °С при энергии воздействия 9 кДж. После проведения МИО образцов на установке с высокой частотой МИП-18 и высокими токами с различной энергией воздействия (от 6 до 10 кДж) максимальное повышение температуры поверхности образца Т19 при энергии воздействия 8 кДж составило 69 °С, что свидетельствует о том, что под воздействием ИМП, создаваемого МИП-18, образцы нагреваются сильнее при меньшей энергии воздействия.

Микротвердость *HV* при нагрузке на индентор 100 г измеряли на поверхности шлифа по пяти точкам, как показано на рисунке 1. Точки измерения находятся на различном расстоянии от спирали индуктора, создающего ИМП. Результаты этих измерений представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1. — Свойства образцов титанового сплава до и после МИО

Маркировка образца титанового сплава ТС4	Температура нагрева образца при МИО после 1/2/3 или 2/4/6 импульсов, Т°	Твердость, <i>HRC</i>	Микротвердость <i>HV</i> , МПа		Суммарное остаточное напряжение, МПа		
			начальное значение <i>HV</i> ₀	значение <i>HV</i> после МИО	начальное значение	значение после МИО	разница
Т2	28/38/48	33...34	2 930...3 590	3 400...3 600	1 675	1 675	0
Т3	28/48/56	33...34	2 926...3 592	3 400...3 600	2 260	2 260	0
Т4	28/48/56	33...34	3 318...3 497	3 150...3 690	2 065	1 915	-150
Т5	28/38/48	30...34	3 406...3 690	2 320...2 790	1 607	1 657	50
Т6	48/51/60	30...31	3 230...3 795	2 930...3 590	1 326	1 319	-7
Т7	28/45/52	33...34	3 230...3 795	3 400...3 800	1 935	1 805	-130
Т8	40/50/60	33...34	3 400...3 690	3 400...3 690	2 001	2 066	65
Т9	41/49/54	30...32	3 320...3 500	3 400...3 690	1 674	1 739	65
Т10	20/34/45	33...34	3 000...3 150	2 226...2 600	1 674	1 870	196
Т11	20/30/44	33...34	3 320...3 500	2 483...2 723	2 262	2 066	-196
Т12	20/30/44	31...33	3 690...4 015	2 540...2 926	2 066	1 870	-196
Т13	20/30/44	33...34	3 074...3 600	2 226...3 000	1 609	2 001	392
Т14	22/34/46	33...34	3 320...3 600	2 324...3 073	1 543	2 001	458
Т15	22/34/46	32...34	3 230...3 600	2 430...3 073	1 674	1 674	0
Т16	25/50/67	33...34	3 074...3 500	2 274...2 660	2 132	2 132	0
Т17	30/40/52	33...34	3 320...3 500	2 135...2 660	1 609	1 609	0
Т18	30/44/58	32...34	3 320...4 015	2 324...2 855	1 870	1 805	-65
Т19	32/53/69	33...34	3 320...3 500	2 788...3 406	2 066	2 262	196

Количественно эффект влияния ИМП характеризовался относительным изменением средней микротвердости по пяти точкам [7]:

$$Q = \frac{HV - HV_0}{HV_0},$$

где HV_0 — исходное среднее значение микротвердости пяти точек образца (МПа);

HV — среднее значение микротвердости пяти точек поверхности образца, подвергнутого МИО (МПа).

Расчеты показали, что относительное изменение средних значений микротвердости поверхности некоторых образцов (Т2, Т3, Т4, Т7, Т8, Т9) почти не изменилось или повысилось на 4,5 %, остальных образцов — понизилось от 6 до 27 %.

Таким образом, установлено, что МИО на низкочастотной установке МИУ-3 нагревает поверхности образцов до 48...55 °С и повышает или не меняет среднее значение микротвердости HV при различных технологических режимах.

Магнитно-импульсная упрочняющая обработка на высокочастотной установке МИП-18 при высоких токах в индукторной системе при различных технологических режимах сильнее нагревает поверхности образцов титанового сплава (до 60...69 °С) и вызывает снижение среднего значения микротвердости HV на 27 %.

Низкая магнитная проницаемость титана (при 20 °С $3,2 \cdot 10^{-6}$ см³ / г) повышается с ростом температуры от –200 до 800 °С по линейному закону. Температурный коэффициент в этом интервале температуры поверхности равен $0,0012 \cdot 10^{-6}$ см³ / г. Резкое возрастание восприимчивости наблюдается в области ($\alpha \rightarrow \beta$)-превращения [6].

При повышенных температурах, а также при повышении легированности титана повышается теплопроводность сплавов на основе титана. Механические свойства титановых сплавов зависят от вида и содержания легирующих элементов, а также от фазового состава и структуры металла. Последнее определяется режимами горячей деформации и термической обработки металла.

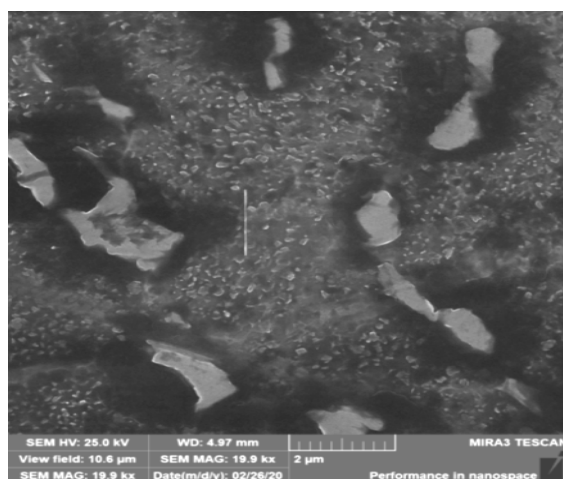
Проведенный рентгеноструктурный анализ образцов до и после МИО показал, что фазовый состав исследуемых образцов сплава ТС4 ($\alpha + \beta$ Ti) не изменился. На рисунке 3 представлены исследования образца Т7 после МИО.

В таблице 1 представлены результаты измерений суммарных остаточных напряжений: на шести образцах (Т4, Т6, Т7, Т11, Т12, Т18) зафиксировано некоторое снижение (до –196 МПа) суммарных макронапряжений на поверхности, на семи образцах — повышение, на пяти — без изменений. Большая разница суммарных остаточных напряжений объясняется, по видимому, не какой-то закономерностью, а погрешностями в проведении измерений. Тем не менее следует отметить некоторую тенденцию к появлению сжимающих напряжений.

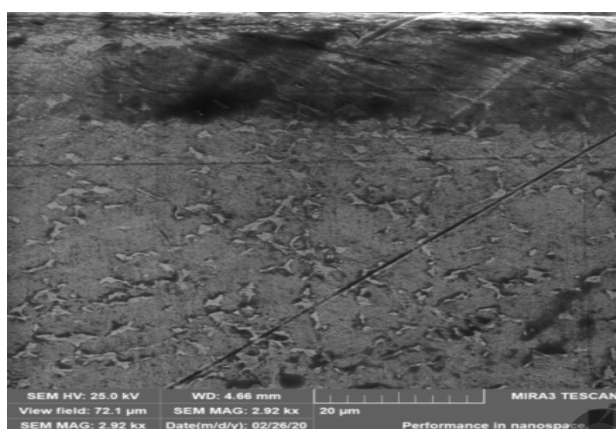
Исследование влияния различных режимов МИО на микроструктуру образцов из титанового сплава. Металлографический анализ микроструктур проведен на образцах титанового сплава ТС4 до и после МИО при различных режимах двух магнитно-импульсных установок — МИП-18 и МИУ-3 — в цилиндрическом индукторе.

Рассмотрим некоторые наиболее интересные микроструктуры с точки зрения исследованных изменений механических свойств (микротвердости, остаточных напряжений). Исследования механических свойств показали, что средняя микротвердость поверхности образца Т3 увеличилась в пределах погрешности измерений, а образца Т9 — повысилась на 4,4 %.

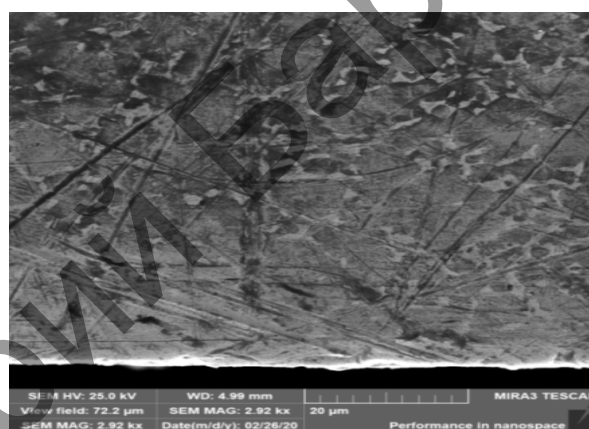
На рисунке 3 представлены микроструктуры образцов Т3 и Т9, полученные на растровом электронном микроскопе MIRA-3. Поверхности этих образцов после МИО на МИУ-3 разогрелись до одинаковой температуры 53...54 °С, однако свойства изменились по-разному.



а)



б)



в)

**Рисунок 3. — Микроструктура образцов сплава TC4 после МИО (РЭМ):
а — середина образца T3; б — край образца T3; в — край образца T9**

На рисунке 3, а, при большом увеличении хорошо видна двухфазная ($\alpha + \beta$) структура сплава TC4. На рисунке 3, б, представлен образец T3, модифицированный МИО, в нижней части расположен край образца, на поверхности которого видна светлая полоса, видимо, слой альфирированного титана.

В верхней части рисунка 3, в, показан край образца T9. На поверхности хорошо видно изменение структуры под воздействием МИО на глубину до 120 мкм.

На рисунке 4 представлены микроструктуры образцов T3 и T9 до и после МИО, полученные при меньшем увеличении ($\times 400$) на металлографическом комплексе МГК-1 на основе оптического микроскопа МКИ-2М.

На рисунке 4, б, представлена микроструктура образца T3 после МИО, на которой модификация поверхности заметна слабо на глубину 30 мкм; на рисунке 4, г, на верхнем краю образца T9 после МИО виден модифицированный МИО поверхностный слой глубиной до 120 мкм.

Поскольку сплав TC4 относится к сплавам, состоящим из α - и β -фаз, α -фаза имеет исходную равновесную структуру, ($\alpha + \beta$)-фаза имеет пластинчатый вид (см. рисунок 4, в). Пластинчатое строение сопровождается увеличением вязкости разрушения. β -фаза считается более пластичной, поэтому β -сплавы более технологичны и лучше обрабатываются давлением, чем α -сплавы.

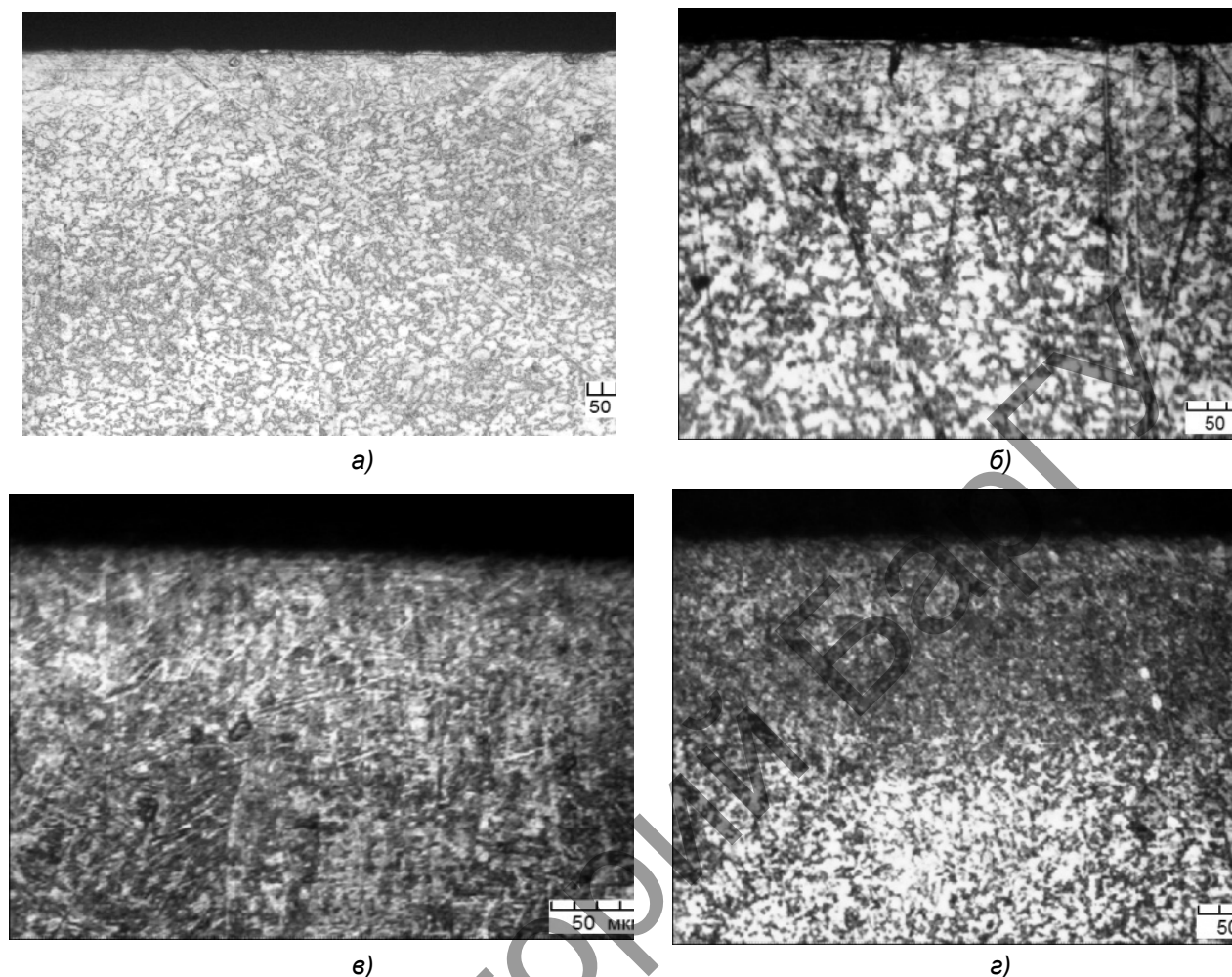


Рисунок 4. — Микроструктуры образцов сплава TC4 до и после МИО, обработанные на МИУ-3: а — образец Т3 до МИО; б — образец Т3 после МИО при 12 кДж шести импульсов; в — образец Т9 до МИО; г — образец Т9 после МИО при 10 кДж пяти импульсов

Одним из механизмов воздействия МИО на сплавы является деформационный. Видимо, модифицированный слой на поверхности образцов порядка 100 мкм образуется под воздействием высокого давления, которое возникает при МИО (см. рисунок 4, г).

На рисунке 5 представлены микроструктуры образцов Т2 и Т7 с повышением значений микротвердости после МИО на 4,7 и 4,75 % соответственно, на которых видно появление небольшого модифицированного слоя светлого цвета глубиной 30...40 мкм. Однако у образца Т2 суммарное остаточное напряжение не изменилось, а у образца Т7 снизилось на 130 МПа. На краю образца Т7 основной β -фазы больше, в некоторых местах наблюдается столбчатая микроструктура (см. рисунок 5, б). На поверхности образца Т2 после проведения МИО в количестве трех импульсов с энергией 12 кДж образуется уплотненный слой глубиной до 65 мкм (см. рисунок 5, г).

После проведения МИО образца Т5 на установке МИП-18 (3 импульса с энергией воздействия 6 кДж) зафиксировано повышение температуры поверхности образца до 48 °С. При этом относительное среднее значение микротвердости по пяти точкам на поверхности снизилось на 23,8 %, суммарное остаточное напряжение увеличилось на 50 МПа, а на микроструктуре на рисунке 6, б, поперечного шлифа четко виден модифицированный уплотненный слой глубиной 60 мкм.

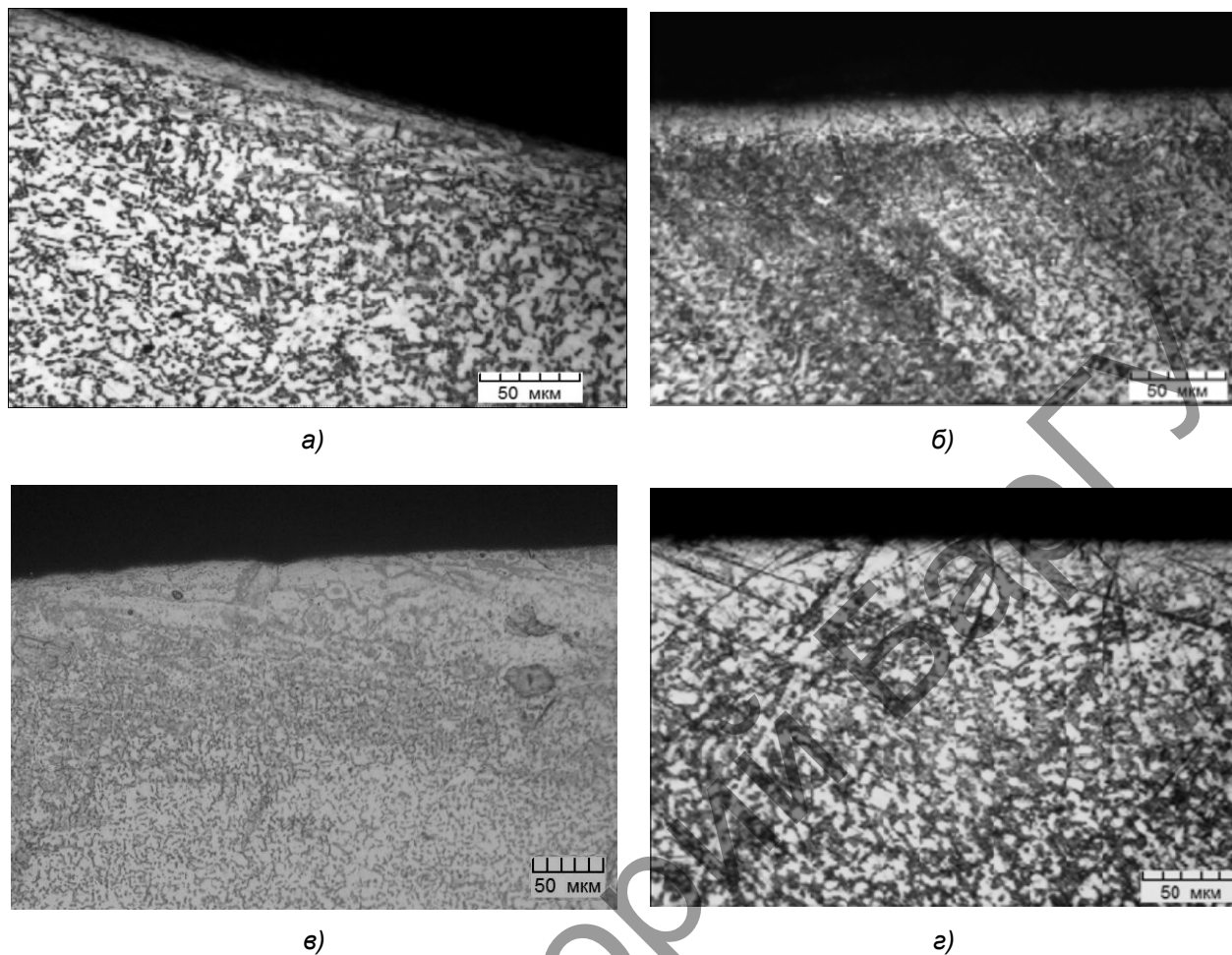


Рисунок 5. — Микроструктура образцов после проведения МИО на МИУ-3: а — образец Т7 до МИО; б — образец Т7 после проведения МИО при 9 кДж четырех импульсов; в — образец Т2 до МИО; г — образец Т2 после проведения МИО при 12 кДж трех импульсов

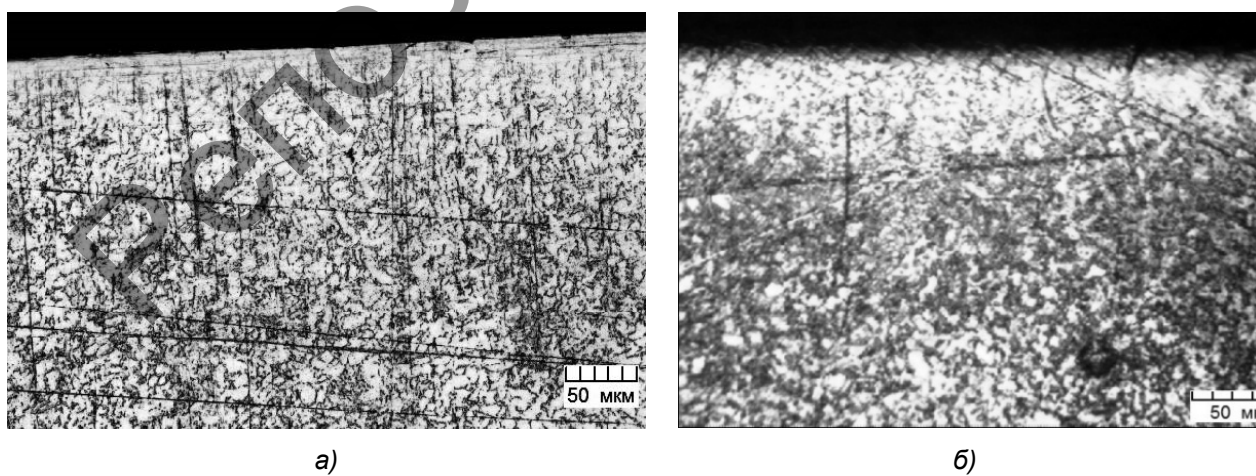


Рисунок 6. — Микроструктура образца Т5 после проведения МИО на МИП-18: а — до МИО; б — после проведения МИО при 6 кДж трех импульсов

Таким образом, металлографический анализ микроструктур показал, что определены технологические режимы МИО, под воздействием которых на некоторых образцах титанового сплава ТС4 в поверхностном слое образовался уплотненный модифицированный слой глубиной 30...120 мкм.

Заключение. Результаты проведенных исследований показали, что опыт работы с различными сталями (ферромагнетиками) не всегда можно с успехом использовать при упрочняющей обработке титановых сплавов (парамагнетиков), которые имеют особенности при структурно-фазовых превращениях. Тем не менее, проведя ряд опытных исследований, можно путем МИО произвести модификацию поверхностного слоя титановых образцов в нужном направлении: повысить или уменьшить микротвердость, добиться получения сжимающих напряжений, получить мелкозернистую структуру, что в совокупности позволит повысить эксплуатационные характеристики изделий из титановых сплавов.

Данная работа была выполнена при поддержке международного белорусско-китайского проекта ГКНТ в рамках договора с БРФФИ № T20КИТГ-003.

Список цитируемых источников

1. Алифанов, А. В. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милукова // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В. В. Клубовича. — Витебск : ВГТУ, 2017. — С. 31—52.
2. Малыгин, Б. В. Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б. В. Малыгин. — М. : Машиностроение, 1998. — 130 с.
3. Магнотриксционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов [и др.] // Весн. Нац. акад. навук. Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. — 2016. — № 4. — С. 31—36.
4. Импульсные методы обработки материалов / АН БССР, Физ.-техн. ин-т. — Минск : Наука и техника, 1977. — 216 с.
5. Модификация поверхности деталей из титановых и алюминиевых сплавов магнитно-импульсной обработкой / А. В. Алифанов [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / редкол.: С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2016. — Кн. 1 : Материаловедение. — С. 4—9.
6. Изменение микротвердости титана VT1-0 при воздействии магнитным полем 0,5 Тл / В. В. Шляров [и др.] // Вестн. Тамб. ун-та. Сер. «Естественные и технические науки». — 2016. — Т. 21, вып. 3 : Физика. — С. 1444—1446.
7. Горынин, И. В. Титан в машиностроении / И. В. Горынин, Б. Б. Чечулин. — М. : Машиностроение, 1990. — 400 с.

Поступила в редакцию 26.04.2021.