

Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 2 (10), 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: 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 и английском языках.
Распространяется на территории Республики Беларусь.

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

Подписано в печать 03.11.2021. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага ксероксная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 14,50. Уч.-изд. л. 9,30.
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, 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., член-корреспондент 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.**,

кандидат 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.**, 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 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 03.11.2021. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 14,50.
Acc.-pub. s. l. 9,30. 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, Doctor of 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.**, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of 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.**, Doctor of 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.**, PhD 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.**, Doctor of 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); **Klochkov A.V.**, Doctor of 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, Doctor of 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.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Interstate educational institution of higher education "Belarusian-Russian University", Mogilev, the Republic of Belarus); **Tomilo V. A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus); **Sheleg V. K.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus).

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Алифанов А. В., Милюкова А. М., Ционенко Д. А. Модель воздействия импульсного магнитного поля на изделие из титанового сплава

Булойчик И. А. Анализ изменения структурообразования интерметаллидных слоев на основе цинка при цинковании термоупрочненных стальных изделий диффузионным способом из газовой фазы

Дубень И. В., Дремук В. А. Расчет числа витков пружин кручения

Жигалов А. Н., Горавский И. А. Экспериментальные исследования износа осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного аэродинамическим звуковым методом

Жигар В. И., Довгяло В. А., Моисеенко В. Л. Определение экономической эффективности практического применения методов повышения производительности звеносборочной линии КБ03

Качанов И. В., Филипчик А. В., Шаталов И. М., Булыга Д. М., Ковалевич В. С., Недвецкий С. В., Денисов В. А. Гидроабразивная технология очистки металлических поверхностей гребных винтов от коррозии

Михайлов М. И., Тетерич Н. Э., Воробей В. И. К вопросу о диагностике резцов по силе резания в условиях роботизированного технологического комплекса

Сиваченко Л. А., Абдукаликова Г. М., Сотник Л. Л., Дыдышко И. М. Проблемы, задачи и пути развития пружинных технологических аппаратов

Сотник Л. Л., Русан С. И., Сиваченко Л. А. Анализ пропускной способности вибровалкового измельчителя с переменными параметрами движения вала

Чаевский В. В., Кулешов А. К., Рудак П. В., Барчик С., Коледа П. Влияние ионно-плазменной обработки лезвий ножей на режущую способность фрезы при фрезеровании древесины

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Дубень И. В. Агротехническая и энергетическая оценка работы плужных корпусов с углоснимами

Крупенин П. Ю. Анализ фазового портрета пульсаций доильного аппарата

Филиппов А. И., Лещик С. Д., Калугин Ю. К., Дубень И. В. Исследование и разработка модели по оптимизации процесса разбрасывания удобрений

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

4 Alifanov A. V., Miliukova A. M., Tsionenko D. A. Model of impact of pulsed magnetic field on titanium alloy product

12 Bulochyk I. A. Analysis of changes in the structure formation of zinc-based intermetallic layers during galvanizing of heat-hardened steel products by diffusion method from the gas phase

17 Duben I. V., Dremuk V. A. Calculation of the number of torsion springs

24 Jigalov A. N., Goravskii I. A. Experimental study of the wear of an axial milling tool made of high-speed steel R6M5, hardened by aerodynamic sound method

42 Zhihar V. I., Dovgualo V. A., Moiseenko V. L. determination of economic efficiency of practical application of methods for improving the productivity of the link assembly line KB03

51 Kachanov I. V., Filipchik A. V., Shatalov I. M., Bulyga D. M., Kovalevich V. S., Nedvetsky S. V., Denisov V. A. Hydro-abrasive technology for cleaning metal surfaces of propellers from corrosion

60 Mikhailov M. I., Teterich N. Э., Vorobei V. I. To the question of cutters diagnostics by cutting force in conditions of a robotic technological complex

67 Sivachenko L. A., Abdalikova G. M., Sotnik L. L., Dydyshko I. M. Problems, tasks and ways of development of spring technological apparatus

78 Sotnik L. L., Rusan S. I., Sivachenko L. A. Analysis of the throughput of a vibrating grinder with variable parameters of the roll movement

88 Chayevski V. V., Kuleshov A. K., Rudak P. V., Barcik Š., Koleda P. The effect of ion-plasma treatment of the blades on the cutting ability of the milling cutter during wood milling

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

95 Duben I. V. Agrotechnical and energy assessment of the work of plough bodies with trashboard

102 Krupenin P. Y. Analysis of the phase portrait of milking machine pulsations

108 Filippov A. I., Leshchik S. D., Kalugin Yu. K., Duben I. V. Research and development of a model for optimizing the fertilizer spreading process

УДК 621.98.044.7

А. В. Алифанов¹, доктор технических наук, профессор;

А. М. Милюкова¹, кандидат технических наук;

Д. А. Ционенко², кандидат физико-математических наук, доцент

¹Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 361 55 52, annart@mail.ru

²Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», ул. Петруся Бровки, 6, 220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 293 84 38

МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ИЗДЕЛИЕ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

На основе разработанной модели проведен анализ изменений фазового состава, которые происходят в поверхностных слоях заготовки, изготовленной из титанового сплава TC4, при магнитно-импульсном упрочнении. Результаты анализа были обобщены, сделаны заключения о характерных особенностях обработки магнитно-импульсным упрочнением изделий из титанового сплава при помощи плоского индуктора.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка; индуктор; напряженность магнитного поля; титановый сплав; модель; импульс; физико-механические свойства.

Рис. 2. Библиогр.: 9 назв.

A. V. Alifanov¹, Doctor of Technical Sciences, Professor;

A. M. Miliukova¹, PhD in Technical Sciences;

D. A. Tsionenko², PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

¹Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,

10 Kuprevich Str., 220004 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 361 55 52, annart@mail.ru

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 6 P. Brovki Str., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 293 84 38

MODEL OF IMPACT OF PULSED MAGNETIC FIELD ON TITANIUM ALLOY PRODUCT

Based on the developed model, an analysis of the change in a phase composition, which occur in the surface layers of the workpiece made of titanium alloy TC4 during magnetic-pulse hardening, was performed. The results of the analysis were summarized and conclusions about the characteristic features of the processing of MPH titanium alloy product with the help of a flat inductor were made.

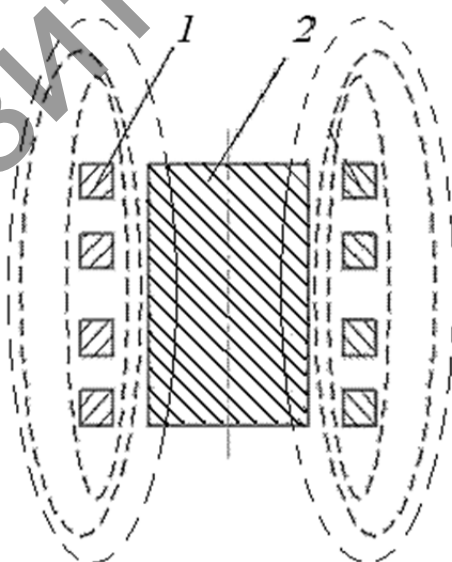
Key words: magnetic pulse processing; inductor; magnetic field strength; titanium alloy; model; impulse; physical and mechanical properties.

Fig. 2. Ref.: 9 titles.

Введение. Целью работы является разработка физико-математической модели для определения параметров магнитно-импульсной упрочняющей обработки (далее — МИО) [1; 2], обеспечивающих улучшение физико-механических свойств изделий, выполненных из титанового сплава TC4 (Ti-6Al-4V) [3].

Известно [4; 5], что конечный результат упрочняющей обработки, в частности наклепа, для титановых сплавов зависит как от свойств сплава, так и от предварительных методов и режимов обработки заготовки. Например, результаты МИО цилиндрического прутка будут отличаться от результатов МИО лопатки турбины, сделанных из одного и того же титанового сплава при одних и тех же режимах обработки. Используя разработанную модель, можно провести анализ результатов воздействия импульсного магнитного поля на конкретное изделие, используя экспериментальные данные, которые были получены для другого изделия, выполненного из того же сплава и обработанного МИО с использованием индуктора другого типа.

Материалы и методы исследования. Описание результатов, полученных на установке с цилиндрическим индуктором для прутка, выполненного из сплава TC4. Рассмотрим однородный металлический немагнитный образец, выполненный из титана TC4 (Ti-6Al-4V) [3], помещенный в магнитное поле напряженностью \vec{H} , возрастающее с течением времени. Обработка прутка из титанового сплава TC4 осуществляется при помощи цилиндрического индуктора (рисунок 1). Структура и параметры установки с цилиндрическим индуктором представлены в работах [2; 6; 7]. При разряде батареи конденсаторов на индуктор в помещенной в нем заготовке возникает индукционный ток. По закону электромагнитной индукции направление индукционного тока препятствует изменению потока вектора магнитной индукции через поперечное сечение заготовки. Возникающие при этом механические усилия деформируют боковую поверхность заготовки [7; 8].



1 — индуктор; 2 — заготовка

Рисунок 1. — Схема обработки цилиндрического образца в цилиндрическом индукторе

В условиях МИО пренебрежение касательными к поверхности металла, составляющими силы давления, справедливо в большинстве случаев [6—8]. Следовательно, на боковую поверхность цилиндрической заготовки, выполненной из металла с высокой проводимостью, действуют только перпендикулярные к поверхности силы давления, обусловленные плотностью энергии магнитного поля.

В случае цилиндрической заготовки распределение напряженностей магнитного поля вне и внутри нее определяет суммарное давление p на боковую поверхность:

$$p = \mu_0 \frac{H_0^2 - \mu H_{\Delta r}^2}{2}, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн / м — магнитная постоянная в системе СИ;

H_0 — напряженность магнитного поля вне заготовки;

μ — магнитная проницаемость титанового сплава;

$H_{\Delta r}$ — напряженность магнитного поля внутри заготовки на расстоянии Δr от поверхности.

Титан относится к парамагнетикам — материалам, имеющим низкую магнитную проницаемость ($\mu = 1$). В случае, когда Δr существенно больше толщины скин-слоя, величина $H_{\Delta r} = 0$, давление на слои вблизи боковой поверхности будет максимальным. При этом формула (1) записывается в следующем виде:

$$p = \mu_0 \frac{H_0^2}{2}.$$

Считая, что в рабочем зазоре поле однородно, а вне его поле отсутствует, для полной энергии W_L и давления p на поверхность заготовки получим следующие выражения:

$$W_L = \frac{\mu_0 H^2}{2} S \Delta, \quad (2)$$

$$p = \frac{W_L}{S \Delta}, \quad (3)$$

где S — площадь поверхности заготовки;

Δ — толщина рабочего зазора индуктора, по порядку величины равная толщине скин-слоя.

Из формул (2) и (3) следует, что максимальная эффективность процесса обработки (обеспечение высокого давления при минимизации энергии импульса) будет достигаться для малых значений Δ . Этого можно достигнуть, увеличивая скорость нарастания импульса магнитного поля. В работе [8] также установлено, что чем меньше толщина рабочего зазора, тем больше напряженность магнитного поля вблизи боковой поверхности заготовки, следовательно, выше эффективность процесса. Поэтому наибольший эффект наблюдается на тех участках прутка из титанового сплава ТС4, которые расположены наиболее близко к индуктору при обработке МИО.

Это подтверждается ранее опубликованными [9] результатами исследования микротвердости, подтверждающими, что в точках, наиболее близких к индуктору, наблюдается увеличение микротвердости HV , что связано с образованием α -фазы в результате МИО на поверхности вблизи индуктора.

Таким образом, для обработки плоских лопаток двигателя следует использовать не цилиндрический, а плоский индуктор, рабочая поверхность которого повторяет профиль лопатки.

Анализ процессов, происходящих вблизи плоского индуктора. Рассмотрим однородный металлический немагнитный образец, выполненный из сплава титана TC4 (Ti-6Al-4V), помещенный в магнитное поле напряженностью \vec{H} , возрастающее с течением времени (рисунок 2), создаваемое плоским индуктором [7; 8].

При изменении магнитного поля, создаваемого индуктором, расположенным вблизи образца, возникает вихревое электрическое поле, возбуждающее токи в объеме заготовки, определяющейся законом электромагнитной индукции:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (4)$$

где Φ — магнитный поток для однородного поля напряженностью \vec{H} , направленной перпендикулярно поверхности, равен:

$$\Phi = \int_s \mu \mu_0 H dS = \pi \mu \mu_0 H r^2, \quad (5)$$

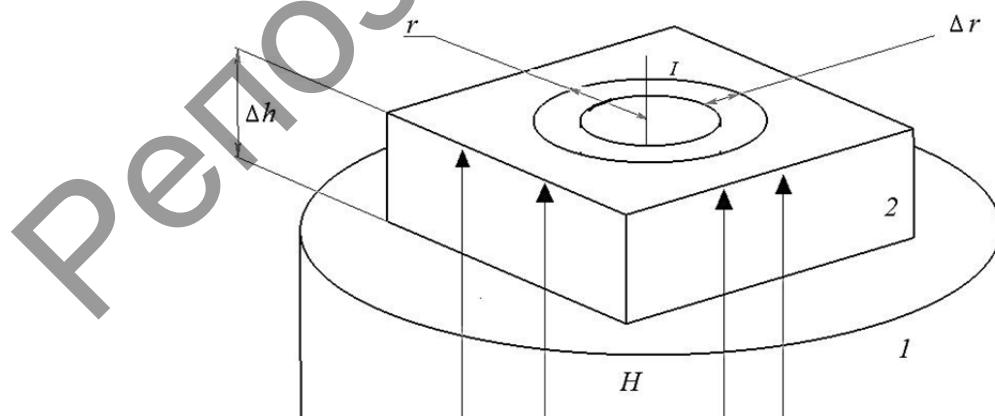
где μ — магнитная проницаемость среды, близкая к единице.

Интеграл в (5) берется по площади, охватываемой контуром радиуса r , в котором возникает индукционный ток. Знак минус в формуле (4) определяет направление индукционного тока, силу которого можно определить в соответствии с законом Ома:

$$I = \frac{|\varepsilon|}{R}, \quad R = \rho \frac{l}{\Delta S} = \rho \frac{2\pi r}{\Delta r \Delta h}, \quad (6)$$

где R — сопротивление кольцевого участка, по которому протекает индукционный ток, с внешним радиусом r , шириной Δr и высотой Δh ;

ρ — удельное сопротивление образца.



1 — индуктор; 2 — заготовка

Рисунок 2. — Возникновение индукционных токов в образце, помещенном в изменяющееся с течением времени магнитное поле плоского индуктора

Окончательно, используя формулы (4) и (6), для плотности вихревого тока получаем:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{I}{\Delta r \Delta h} = \frac{\mu \mu_0 r}{2\rho} \frac{dH}{dt}. \quad (7)$$

Из формулы (7) видно, что с увеличением скорости нарастания напряженности магнитного поля dH/dt , создаваемого индуктором, как и при увеличении радиуса вихревого тока, плотность тока возрастает. При этом для плоского индуктора линии тока представляют собой концентрические окружности, расположенные в плоскостях, параллельных поверхности образца и перпендикулярных силовым линиям магнитного поля индуктора.

Модуль напряженности магнитного поля \vec{H}_1 , создаваемого вихревым током в центре витка, определяется формулой $H_1 = I/2r$. Тогда, учитывая однородность материала заготовки и однородность магнитного поля, создаваемого индуктором, для величины H_1 из формул (4) и (7) получаем [7]:

$$H_1 = \frac{\mu \mu_0}{4\rho} \frac{dH}{dt} \Delta r \Delta h. \quad (8)$$

Направление вектора \vec{H}_1 противоположно направлению вектора \vec{H} при нарастании тока в индукторе, и результирующее магнитное поле вблизи поверхности, определяемое в соответствии с принципом суперпозиции $\vec{H}_0 = \vec{H} + \vec{H}_1$, уже не будет однородным. Оно сохраняет осевую симметрию, и минимальное значение достигается в центре поверхности образца, обращенной к индуктору. В результате функция $H_0(r, h, t)$ может быть представлена в таком виде: $H_0(r, h, t) = H_{0h}(h)H_{0r}(r)H_{0t}(t)$. Переходя в выражении (8) к бесконечно малым величинам dh и dr , получаем дифференциальное уравнение для определения зависимости напряженности результирующего магнитного поля от глубины проникновения в материал образца [7]:

$$\frac{d^2(H_0(h, r, t))}{dh dr} = \frac{\mu \mu_0}{\rho} \frac{d(H_0(h, r, t))}{dt}. \quad (9)$$

Временная зависимость dH/dt , характеризующая нарастание магнитного поля индуктора, определяется периодом колебаний, возникающих при разрядке батареи конденсаторов на индуктор. В случае обработки немагнитных материалов индуктивность магнитной цепи мала. В результате временная зависимость магнитного поля

$$H_{0t}(t) = H_t(t) = H_{\max} \exp(-\beta t) (\sin(\omega t)),$$

где $\beta = R_M / L$ — коэффициент затухания, R_M — сопротивление цепи индуктора;

$\omega = (\sqrt{LC})^{-1}$ — циклическая частота колебаний контура, L — индуктивность магнитной цепи «индуктор—заготовка», C — емкость конденсатора.

При граничном условии $H_{0h}(0) = H_{\max}$ получаем решение уравнения (9) в следующем виде [8]:

$$H_0(r, h, t) = H_{\max}(r) (\exp(-\alpha h - \beta t)) \sin(\omega t - kh), \quad \alpha = \sqrt{\frac{\mu\mu_0\omega}{2\rho}}, \quad (10)$$

где α — величина, обратная толщине скин-слоя в металле;

k — постоянная распространения электромагнитной волны циклической частотой ω в металле.

Потенциальная энергия контура с током в магнитном поле определяется формулой:

$$W = -\pi\mu\mu_0 H_0 I r^2. \quad (11)$$

Знак минус в формуле (11) связан с тем, что нормаль к контуру направлена противоположно вектору магнитного поля. Сила, действующая на контур в неоднородном магнитном поле, в данном случае направлена внутрь образца и определяется соотношением:

$$F_h = -\frac{\partial W}{\partial h}. \quad (12)$$

Используя формулу (7), приходим к выводу, что плотность тока также изменяется с глубиной, причем функциональная зависимость от глубины аналогична (10). Тогда для усредненного по времени давления, оказываемого магнитным полем на поверхность образца, на основании (12) получаем следующее выражение:

$$\langle p(h) \rangle_t = \frac{\mu\mu_0}{4} H_{\max}^2(r) (\exp(-2\alpha h)). \quad (15)$$

При напряженности магнитного поля $H_{\max} = 10^7$ А / м и длительности импульса $\tau = 1$ мс (эти параметры определяются конструктивными особенностями установки [6; 7]), удельном сопротивлении $\rho = 10^{-6}$ Ом · м, магнитной проницаемости среды $\mu = 1$ (что характерно для титана), размерах образца $r = 10^{-2}$ м, получаем следующие численные оценки процесса: плотность тока $j = 10^5$ А / м², толщина скин-слоя $\alpha^{-1} = 10^{-3}$ м, среднее давление на поверхности образца $\langle p(0) \rangle_t = 10^7$ Па.

Запишем выражение, определяющее преобразование энергии магнитного поля (11) в энергию упругой и пластической деформации, энергию фазового перехода между α - и β -фазами, а также энергию, выделяемую в виде теплоты для малого объема обрабатываемой поверхности, расположенной в непосредственной близости к плоскости индуктора:

$$\frac{\mu\mu_0}{4} H_{\max}^2(r) (\exp(-2\alpha h)) = \eta \left(\frac{E \varepsilon(h)^2}{2} + \Delta V \langle W(T) \rangle + j^2(r, h) \rho \right), \quad (13)$$

где η — коэффициент, определяющий долю преобразованной энергии;
 E — модуль упругости материала заготовки;
 ε — относительное удлинение;
 ΔV — объем материала, переходящего из β - в α -фазу;
 $\langle W(T) \rangle$ — средняя энергия, выделяющаяся при преобразовании единицы объема β -фазы в α -фазу.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ изменения фазового состояния изделий из титанового сплава ТС4 под воздействием импульсного магнитного поля. Анализируя выражение (13), приходим к выводу о неоднородности воздействия импульсного магнитного поля на материал образца. Механические напряжения возникают в области, прилегающей к индуктору, и экспоненциально уменьшаются в направлении вглубь материала. При этом в плоскости, параллельной индуктору, они обладают аксиальной симметрией, и максимальное механическое напряжение возникает в центре образца. Максимальное выделение тепла происходит на краях заготовки, как следует из выражения (7), что также обуславливает неоднородность процесса обработки однородных немагнитных материалов типа ТС4. Из проведенного анализа и оценки численных данных можно сделать вывод о том, что МИО изделий из материалов, обладающих указанными характеристиками, но не обладающих высокой пластичностью, целесообразна для упрочнения их поверхности при указанных параметрах напряженности магнитного поля индуктора и времени импульса.

Упрочнение связано с переходом части материала из β -фазы в α -фазу на обрабатываемой поверхности. Фазовый переход связан с перемещением дислокаций и миграцией примесей (атомов алюминия), поддерживающих устойчивость β -фазы по направлению вглубь образца. В результате происходит образование упрочненного поверхностного слоя, в котором после обработки МИО, как и в результате механического наклепа, наблюдается преимущественное выделение α -фазы.

Целесообразность обработки поверхности лопаток турбины двигателя, сделанных из титанового сплава ТС4, посредством магнитно-импульсного упрочнения связана с тем, что при создании направленного потока воздуха лопатки турбины подвергаются не только переменным механическим воздействиям при высоких температурах окружающей среды, но и износу вследствие трения о воздух и мелкие частицы взвесей, содержащихся в воздухе. При этом образование упрочненного слоя на поверхности изделия, представляющего собой материал с повышенным содержанием α -фазы титана, препятствует разрушению изделия под действием как механических нагрузок, так и ударно-волновых эффектов и трения. Важную роль в обеспечении эксплуатационных характеристик деталей играет то, что твердый, но хрупкий слой на поверхности детали, представленный α -фазой, связан с более мягким и пластичным слоем, который характеризуется повышенным содержанием β -фазы, находящемся под обработанной поверхностью. Такая слоистая структура препятствует образованию сколов и микротрещин на поверхности детали, которые могут возникнуть в результате эксплуатации [4].

Заключение. В рассматриваемом случае подбор режимов обработки изделия следует осуществлять только непосредственно на лопатках двигателя, а не на заготовках (прутках), выполненных из этого же материала, но по иной технологии. Это связано с тем, что характеристики титановых сплавов после упрочнения существенно зависят от режимов предварительной обработки (температуры, скорости охлаждения, механических напряжений и т. д.) [4; 5]. При этом обработка хрупких однородных образцов, таких как титановые сплавы с повышенным содержанием α -фазы по всему объему, посредством магнитно-импульсного воздействия может приводить к нарушению целостности образца, образованию трещин и повышенному уровню остаточных механических напряжений, распределенных с большим градиентом как в аксиальном, так и в радиальном направлении [8]. Вышесказанное подтверждается результатами работы [6], в которой сделано заключение об увеличении эффективности процесса магнитно-импульсного упрочнения с ростом неоднородности структуры материала.

Особое внимание при обработке лопаток турбины из титанового сплава ТС4 посредством МИО необходимо уделять ее кромкам, поскольку при обработке плоским индуктором именно по периметру заготовки выделяется наибольшее количество теплоты и теплоотвод

затруднен, так как окружающей средой является воздух с низкой теплопроводностью и теплоемкостью. Это может создать условия для повышенного содержания α -фазы титанового сплава в области кромок и повышения хрупкости детали в этой области.

Данная работа была выполнена при поддержке международного белорусско-китайского проекта ГКНТ в рамках договора с БРФФИ №Т20КИТГ-003 от 17.02.2020.

Список цитируемых источников

1. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий / А. В. Алифанов [и др.] // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки : материалы 9-й Междунар. практ. конф., Санкт-Петербург, 10—13 апр. 2007 г. — СПб. : Изд-во Политехн. ин-та, 2007. — Ч. 2. — С. 12—20.
2. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // Литье и металлургия. — 2012. — № 3. — С. 77—83.
3. На страницу ГОСТов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.titanium-fiko.com/pages/GOSTS/Ti_alloys_china.htm. — Режим доступа: 14.04.2021.
4. Титановые сплавы в машиностроении / Б. Б. Чечулин [и др.]. — Л. : Машиностроение, 1977. — 248 с.
5. Воробьева, Г. А. О структурных превращениях в металлах и сплавах под воздействием импульсной обработки / Г. А. Воробьева, А. Н. Иводитов, А. М. Сизов // Изв. АН СССР. Металлы. — 1991. — № 6. — С. 131—137.
6. Импульсные методы обработки материалов / АН БССР, Физ.-техн. ин-т. — Минск : Наука и техника, 1977. — 216 с.
7. Алифанов, А. В. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // Литье и металлургия. — 2012. — № 4. — С. 151—155.
8. Расчет давлений в системе «индуктор—заготовка» при магнитно-импульсной обработке металлов // А. В. Алифанов [и др.] // Вестн. БарГУ. Сер. «Физико-математические науки. Технические науки». — 2013. — Вып. 1 (4). — С. 31—37.
9. Исследование физико-механических свойств титанового сплава после магнитно-импульсной обработки // А. М. Милокова [и др.] // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2021. — Вып. 1 (9). — С. 18—26.

Поступила в редакцию 04.10.2021.