

# 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 вёрстка 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 углоснимками

**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., Abdukalikova 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 Chayeuski 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. Алифанов<sup>1</sup>**, доктор технических наук, профессор;

**А. М. Милюкова<sup>1</sup>**, кандидат технических наук;

**Д. А. Ционенко<sup>2</sup>**, кандидат физико-математических наук, доцент

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

<sup>2</sup>Учреждение 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. Alifanov<sup>1</sup>**, Doctor of Technical Sciences, Professor;

**A. M. Miliukova<sup>1</sup>**, PhD in Technical Sciences;

**D. A. Tsionenko<sup>2</sup>**, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

<sup>1</sup>Physical-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

<sup>2</sup>Belarusian 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.

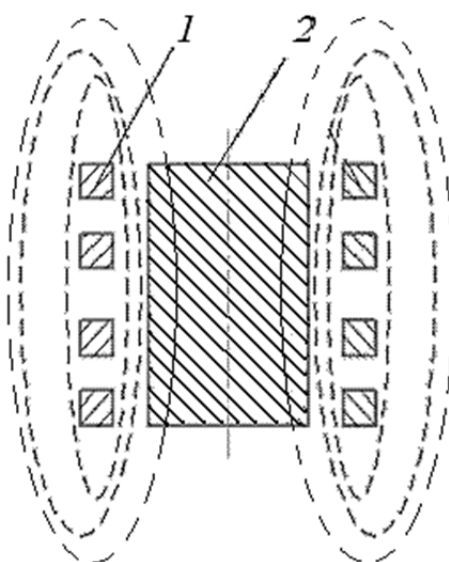
**Key words:** magnetic pulse processing; inductor; magnetic field strength; titanium alloy; model; impulse; physical and mechanical properties.

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;

$\mu$  — магнитная проницаемость титанового сплава;

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

Титан относится к парамагнетикам — материалам, имеющим низкую магнитную проницаемость ( $\mu = 1$ ). В случае, когда  $\Delta r$  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;

$\Delta$  — 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  $\Delta$ . 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  $\alpha$ -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 ТС4 (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  $\Phi$  — магнитный поток для однородного поля напряженностью  $\vec{H}$ , направленной перпендикулярно поверхности, равен:

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

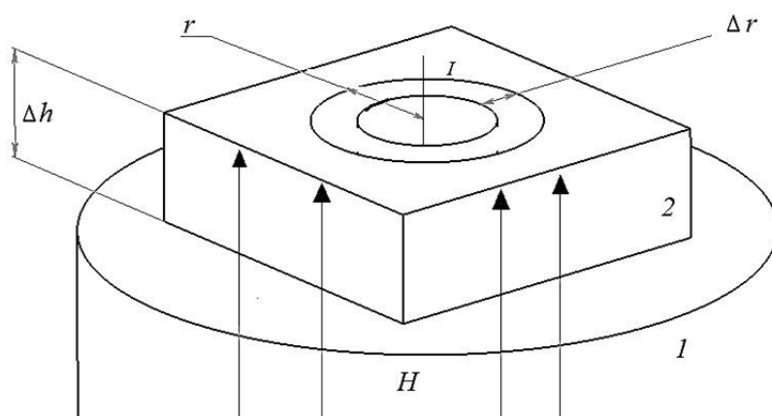
где  $\mu$  — магнитная проницаемость среды, близкая к единице.

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  $\Delta r$  и высотой  $\Delta h$ ;

$\rho$  — 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  $\alpha$  — величина, обратная толщине скин-слоя в металле;

$k$  — постоянная распространения электромагнитной волны циклической частотой  $\omega$  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 / м<sup>2</sup>, 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  $\alpha$ - и  $\beta$ -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  $\eta$  — коэффициент, определяющий долю преобразованной энергии;  
 $E$  — модуль упругости материала заготовки;  
 $\varepsilon$  — относительное удлинение;  
 $\Delta V$  — объем материала, переходящего из  $\beta$ - в  $\alpha$ -фазу;  
 $\langle W(T) \rangle$  — средняя энергия, выделяющаяся при преобразовании единицы объема  $\beta$ -фазы в  $\alpha$ -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  $\beta$ -фазы в  $\alpha$ -фазу на обрабатываемой поверхности. Фазовый переход связан с перемещением дислокаций и миграцией примесей (атомов алюминия), поддерживающих устойчивость  $\beta$ -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  $\alpha$ -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  $\alpha$ -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  $\alpha$ -фазой, связан с более мягким и пластичным слоем, который характеризуется повышенным содержанием  $\beta$ -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  $\alpha$ -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  $\alpha$ -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](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.

УДК 669.58

**И. А. Булойчик**

Учреждение образования «Белорусский национальный технический университет»,  
пр-т Независимости, 65, 220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 293 93 30, ilya.by@gmail.com

## **АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ ЦИНКА ПРИ ЦИНКОВАНИИ ТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДИФФУЗИОННЫМ СПОСОБОМ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ**

Приведены данные по исследованию формирования цинковых интерметаллидных диффузионных слоев на термически упрочненных поверхностях в условиях структурного изменения металла. Для цинковых диффузионных слоев, сформированных на мартенситной стальной основе, наблюдали повышение значений микротвердости и зоны формирования твердого раствора цинка в железе ( $\alpha$ -фаза) в сравнении с цинковыми диффузионными слоями, сформированными на стали с перлитной структурой.

**Ключевые слова:** термодиффузионное цинкование в порошковых насыщающих средах; защита от коррозии; диффузионный слой; микроструктура; микротвердость.

Рис. 5. Библиогр.: 5 назв.

**I. A. Buloichyk**

Belorussian National Technical University, 65 Nezavisimosti Ave., 220013 Minsk,  
the Republic of Belarus, +375 (17) 293 93 30, ilya.by@gmail.com

## **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**

Data on the study of the formation of zinc intermetallic diffusion layers on thermally hardened surfaces under conditions of structural change of the metal are presented. For zinc diffusion layers formed on a martensitic steel base, an increase in the values of microhardness and the zone of formation of a solid solution of zinc in iron ( $\alpha$ -phase) was observed in comparison with zinc diffusion layers formed on steel with a pearlite structure.

**Key words:** thermodiffusion galvanizing in powder saturating media; corrosion protection; diffusion layer; microstructure; microhardness.

Fig. 5. Ref.: 5 titles.

**Введение.** Проблемы антикоррозионной защиты металлоизделий были и остаются актуальными для промышленно развитых стран. Существует множество технологий получения антикоррозионных покрытий на стальных и чугунных деталях. Значительная часть производства антикоррозионных покрытий отведена технологиям цинкования. Следует отметить, что в настоящее время в Республике Беларусь существует достаточно большое количество предприятий, обеспечивающих цинкование изделий в расплавах цинка и электролитах. Однако традиционные цинковые покрытия, полученные данными способами, в ряде случаев не обеспечивают требуемые эксплуатационные показатели [1; 2]. Одним из альтернативных

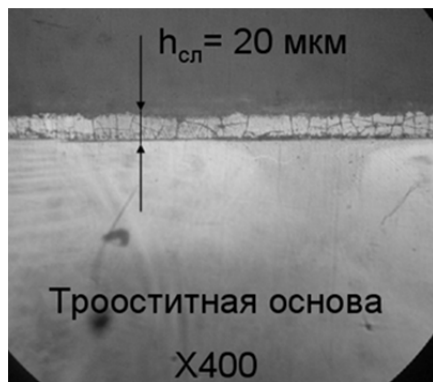
направлений в сфере получения защитных цинковых покрытий на стальных изделиях является способ термодиффузионного цинкования в порошковых насыщающих средах (далее — ТДЦ). Преимущественной особенностью данного способа является возможность замены процессом ТДЦ ряда операций термической обработки деталей (отпуска), что ведет к снижению затрат на термическую и антикоррозионную обработку изделий.

При формировании интерметаллидных слоев на основе цинка важное значение имеет структура стальной основы, на которой происходит диффузионное взаимодействие атомов насыщающего элемента и насыщаемой основы. В большинстве случаев при антикоррозионной обработке стальных изделий данным способом формирование диффузионного слоя происходит на ферритно-перлитных структурах с низким содержанием легирующих элементов. С учетом традиционного температурного интервала протекания процессов ТДЦ (380...420 °С) формирование диффузионного цинкового слоя на стальных изделиях возможно также после закалки на мартенсит. В этом случае процесс происходит в условиях диффузионного распада пересыщенного твердого раствора (мартенсита) [3]. Формирование диффузионного слоя происходит на поверхности с большой степенью дефектности кристаллического строения в условиях значительных структурных напряжений. С одной стороны, из теории диффузии известно, что чем выше степень дефектности (дислокации, границы раздела фаз и др.) насыщаемой подложки, тем интенсивнее будет происходить диффузионное проникновение насыщающего атома в поверхность подложки за счет увеличенного количества «легких путей диффузии». Процессы интенсивной фазовой перекристаллизации во время распада мартенсита при отпуске также могут активировать взаимную диффузию атомов железа и цинка, способствуя более активному формированию диффузионного слоя. С другой стороны, с учетом данных источника [4], где указано, что формирование диффузионных слоев на основе цинка происходит в условиях взаимной диффузии атомов железа и цинка, значительные термические и структурные напряжения в мартенсите, а также большая, по сравнению с перлитными структурами, концентрация углерода могут препятствовать встречной диффузии атомов железа и замедлять формирование интерметаллидных фаз диффузионного слоя. Следовательно, рассматривая процессы диффузионного взаимодействия атомов цинка с поверхностью пересыщенного твердого раствора (мартенсита), следует учитывать влияние закалочных напряжений на характер диффузии атомов железа.

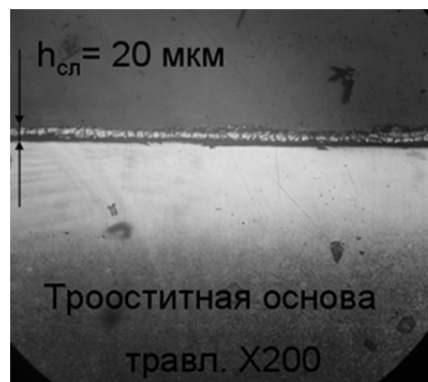
**Материалы и методы исследования.** Для определения свойств и состава диффузионных слоев использовали методы оптической микроскопии в совокупности с методом измерения микротвердости вдавливанием алмазных наконечников по ГОСТ 9450-76.

**Организация исследования.** Цинкованию подвергали образцы из стали 65Г в структурном состоянии перлит зернистый (состояние поставки проволоки из стали 65Г), мартенсит в отожженном состоянии при 830 °С, структурно соответствующему ферритно-перлитной структуре (Ф + П). Формирование слоя производили термодиффузионным цинкованием во вращающемся контейнере и в стационарных тиглях с применением порошковых насыщающих сред на основе чистого цинка без применения активаторов при различной длительности выдержки. С применением вращающегося контейнера длительность выдержки образцов составляла 30 и 50 мин. Длительность выдержки образцов с применением стационарных тиглей составляла до 2,5 ч.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Толщина цинковых диффузионных слоев, полученных во вращающемся контейнере, составляла порядка 20 мкм для каждого типа подложек (рисунки 1—3).

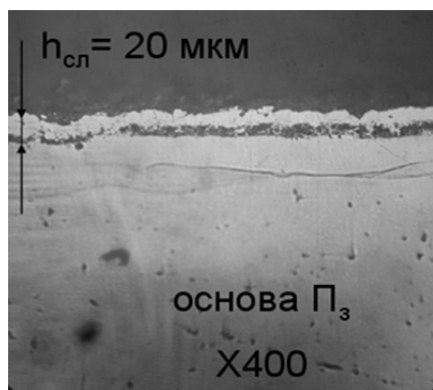


а)

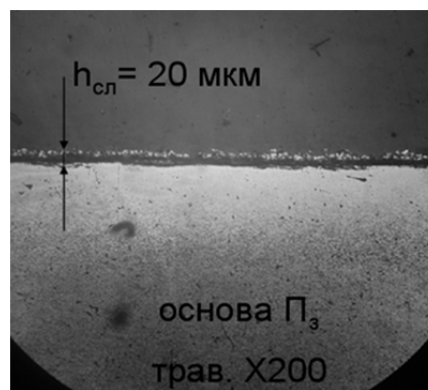


б)

Рисунок 1. — Диффузионный цинковый слой, полученный на стали 65Г после закалки. Исходная структура стальной основы: мартенсит тетрагональный и аустенит остаточный. Цинкование 410 °С, 30 мин: а — шлиф не травлен; б — травление 3 %  $\text{HNO}_3$

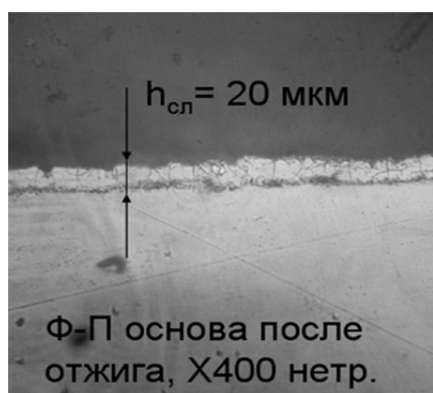


а)

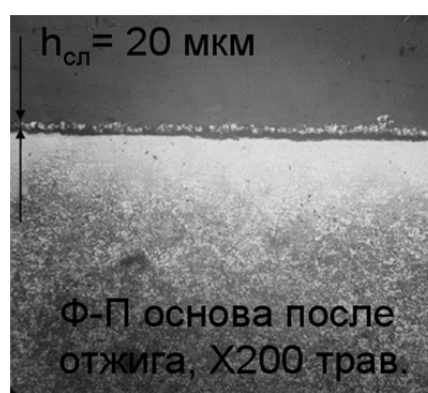


б)

Рисунок 2. — Диффузионный цинковый слой, полученный на стали 65Г после закалки. Исходная структура стальной основы: перлит зернистый. Цинкование 410 °С, 30 мин: а — шлиф не травлен; б — травление 3 %  $\text{HNO}_3$



а)



б)

Рисунок 3. — Диффузионный цинковый слой, полученный на стали 65Г после полного отжига. Исходная структура стальной основы: перлит пластинчатый + феррит избыточный. Цинкование 410 °С, 30 мин: а — шлиф не травлен; б — травление 3 %  $\text{HNO}_3$

Следует отметить, что для цинковых диффузионных слоев, полученных на стальной мартенситной основе, характерна большая равномерность формирования (сохранение одинаковой толщины диффузионного слоя на разных участках шлифа). Повышение значений микротвердости для цинковых диффузионных слоев, сформированных на мартенситной подложке, объясняется более активным протеканием диффузионных процессов при формировании цинкового диффузионного слоя на подложке такого типа, что, в свою очередь, влияет на фазовый состав формируемого диффузионного слоя. Отличительной особенностью диффузионно-оцинкованных образцов с мартенситной основой является увеличенная зона  $\alpha$ -фазы, представленная на шлифе в виде слабо травящейся светлой полосы под цинковым диффузионным слоем, а также повышение значений микротвердости диффузионного слоя до 3 300 МПа в сравнении с цинковыми диффузионными слоями, сформированными на перлитной и ферритно-перлитной основах (рисунки 4, 5).

Повышение значений микротвердости для цинковых диффузионных слоев, сформированных на мартенситной подложке, связано с более активным протеканием сорбционных и диффузионных процессов при формировании цинкового диффузионного слоя на стальной подложке мартенситного типа, что, в свою очередь, влияет на фазовый состав формируемого диффузионного слоя.

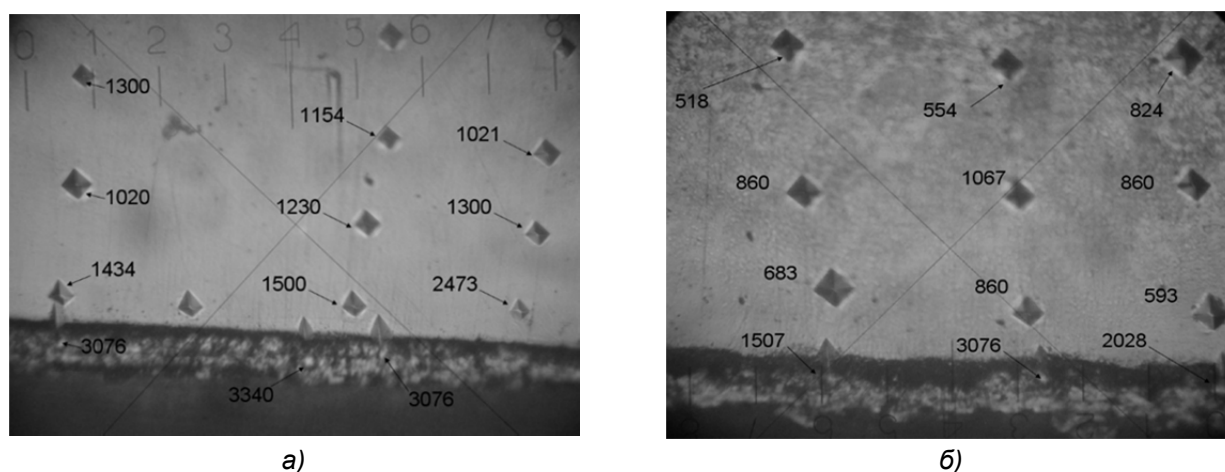


Рисунок 4. — Микротвердость на мартенситной (а) и ферритно-перлитной стальных основах (б) после термодиффузионного цинкования при 410 °С, 30 мин

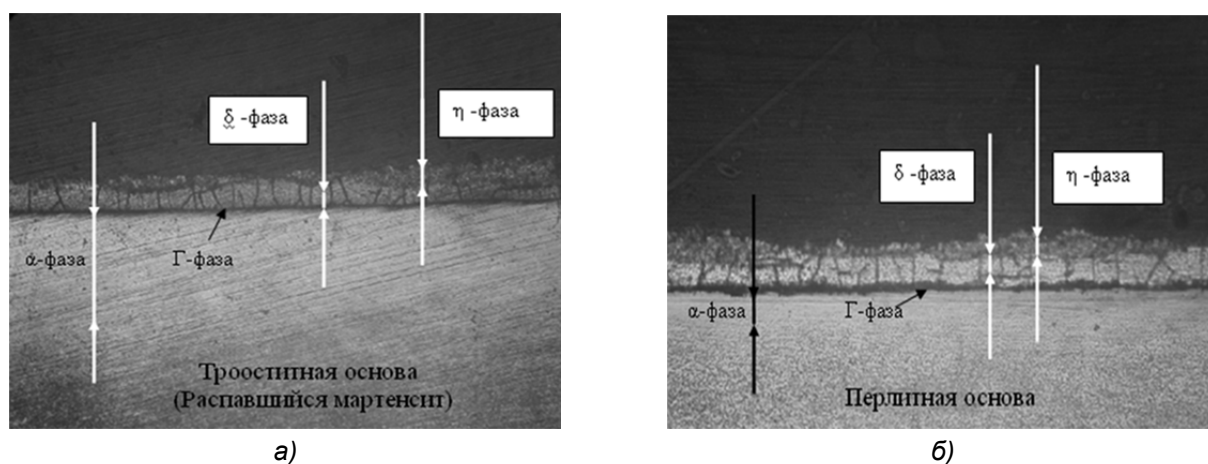


Рисунок 5. — Различия формирования зоны  $\alpha$ -фазы для цинковых диффузионных слоев сформированных на мартенситной (а) и перлитной (перлит зернистый) основах (б),  $\times 400$

Увеличение зоны  $\alpha$ -фазы для цинковых диффузионных слоев, сформированных на мартенситной основе, связано с наличием большого количества дефектов структуры, характерных для мартенсита закалки и являющихся дополнительными «путями» диффузии для атомов насыщающего элемента. Если принять, что  $\alpha$ -фаза (твердый раствор цинка в железе) формируется одной из первых при формировании диффузионного цинкового слоя [5], то увеличение зоны  $\alpha$ -фазы для мартенситной основы может быть связано с более активной диффузией (на большую глубину) атомов цинка в металлическую поверхность за счет большей дефектности кристаллического строения мартенситной стальной основы в сравнении с перлитной.

**Заключение.** Исходная структура стального изделия перед процессом цинкования может оказывать существенное влияние на характер формирования диффузионного слоя. Наличие мартенситной структуры стальной основы влияет на характер формирования цинковых диффузионных слоев, что подтверждается увеличением зоны твердого раствора цинка в железе ( $\alpha$ -фазы) после процесса цинкования. Для цинковых диффузионных слоев, сформированных на ферритно-перлитных и перлитных основах, характерна неравномерность формирования, что может быть связано с более низкой активностью протекания диффузионных процессов на данном типе стальной основы.

#### Список цитируемых источников

1. Константинов, В. М. Антикоррозионные цинковые покрытия на стальных изделиях: перспективы термодиффузионных покрытий / В. М. Константинов, Н. И. Иваницкий, Л. А. Астрейко // *Литье и металлургия*. — 2013. — № 4 (73). — С. 107—110.
2. Константинов, В. М. Исследование структурообразования гальванически оцинкованных покрытий при термическом воздействии / В. М. Константинов, И. А. Булойчик // *Вестн. БарГУ. Сер. «Физико-математические науки (Физика). Технические науки (Машиностроение и машиноведение. Процессы и машины агроинженерных систем)»*. — 2013. — Вып. 1. — С. 96—101.
3. Константинов, В. М. Особенности реализации процессов термодиффузионного цинкования при антикоррозионной защите термообработанных стальных изделий / В. М. Константинов, И. А. Булойчик // *Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий: материалы 3-го Респ. науч.-техн. семинара, Минск, 5—6 дек.* / Белорус. гос. техн. ун-т. — Минск, 2013. — С. 66—70.
4. Сотсков, Н. И. Исследование физико-химических и технологических процессов при термодиффузионном цинковании / Н. И. Сотсков, Б. М. Жуков // *Промышл. и гражд. стр-во*. — 2009. — № 5. — С. 28—31.
5. Проскуркин, Е. В. Диффузионные цинковые покрытия / Е. В. Проскуркин, Н. С. Горбунов. — М.: Металлургия, 1972. — 248 с.

Поступила в редакцию 14.10.2021.



УДК 62-272.22

**И. В. Дубень**<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент;  
**В. А. Дремук**<sup>2</sup>, кандидат технических наук, доцент

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,  
225404 Барановичи, Республика Беларусь, <sup>1</sup>+375 (29) 824 26 49, duben\_i\_v@mail.ru, <sup>2</sup>drv1@tut.by

## РАСЧЕТ ЧИСЛА ВИТКОВ ПРУЖИН КРУЧЕНИЯ

Известные выражения для расчета необходимого числа витков пружин кручения являются приближенными и не учитывают физико-механических свойств материала, из которых изготавливаются пружины. Предложена формула для расчета числа витков, которая учитывает необходимое и достаточное число параметров — допустимое напряжение на изгиб и модуль упругости материала пружины, а также показатель деформации кручения — предельный угол закручивания. Расчет числа витков по предлагаемой формуле обеспечивает наиболее точное выполнение условия прочности пружины при предельной нагрузке.

**Ключевые слова:** пружина кручения; сталь пружинная; число витков; напряжение изгиба; момент кручения; угол закручивания.

Рис. 2. Табл. 2. Библиогр.: 3 назв.

**I. V. Duben**<sup>1</sup>, PhD in Technical Sciences, Associate Professor;  
**V. A. Dremuk**<sup>2</sup>, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Educational institution “Baranovichi State University”, 21 Voikova Str., 225401 Baranovichi,  
the Republic of Belarus, <sup>1</sup>+375 (29) 824 26 49, duben\_i\_v@mail.ru, <sup>2</sup>drv1@tut.by

## CALCULATION OF THE NUMBER OF TORSION SPRINGS

It has been established that the known expressions for calculating the required number of turns of torsion springs are approximate and do not take into account the physical and mechanical properties of the material from which the springs are made. Based on the analysis of loading, a formula for calculating the number of turns is proposed. It takes into account the necessary and sufficient number of parameters — the permissible bending stress and the elastic modulus of the spring material, as well as the torsional deformation index — the limiting angle of twisting. The calculation of the number of turns according to the proposed formula provides the most accurate fulfillment of the spring strength condition at the maximum load.

**Key words:** torsion spring; spring steel; number of turns; bending stress; torsional moment; twist angle.

Fig. 2. Table 2. Ref.: 3 titles.

**Введение.** При практических расчетах по выбору пружин кручения возникает задача определения сразу нескольких параметров — диаметра проволоки, среднего диаметра пружины, числа витков  $n$  и других — при наличии конструктивных ограничений на наружный и внутренний диаметры пружины, начальный (установочный) и максимальный рабочий моменты кручения. Известные методики расчета числа витков пружин [1; 2], учитывающие различные параметры, могут привести к отличающимся результатам, что приводит к необходимости повторения расчетов для пружин с другими параметрами.

Помимо пружинной стали (60С2, 50ХФА и т. п.) пружины изготавливаются из нержавеющей сталей (12Х18Н10Т, ХН77ТЮР и т. п.) и других материалов с различными физико-механическими свойствами. Поэтому уже на стадии предварительного расчета числа витков бывает необходимо в полной мере учитывать механические и прочностные свойства материала пружин с необходимым запасом прочности.

**Материалы и методы исследования.** Исходными данными для выбора пружин кручения являются:

- класс и разряд пружины;
- физико-механические свойства материала — модуль упругости материала  $E$ , допускаемые касательное напряжение кручения  $[\tau_3]$ , на изгиб  $[\sigma_{изг}]$  и смятие  $[\sigma_{см}]$  (МПа);
- установочный и максимальный рабочие моменты кручения  $M_1$  и  $M_2$  (Н · мм);
- рабочий ход пружины  $\Delta\alpha$  или значения установочного и максимального рабочего углов закручивания  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (град);
- допустимые интервалы геометрических размеров пружины — диаметра проволоки  $d$ , среднего  $D$ , наружного  $D_1$  и внутреннего  $D_2$  диаметров, длины пружины в свободном состоянии  $L_0$  (мм).

При работе пружины кручения в поперечных сечениях витков возникает момент  $M$ , равный внешнему моменту, закручивающему пружину, вектор которого направлен вдоль осевой линии пружины. При разложении момента  $M$  по осевой линии витка пружины и перпендикулярному ему направлению в поперечном сечении витка пружины возникают напряжения изгиба  $\sigma_{изг}$  и кручения  $\tau_{кр}$ . Так как изгибающий момент при угле подъема винтовой линии, не превышающем  $12...15^\circ$ , значительно больше крутящего, то пружины кручения рассчитывают только на изгиб, при этом допускаемое напряжение проволоки пружины на изгиб рекомендуется принимать равным  $[\sigma_{изг}] = 1,25 [\tau_{кр}]$ , где  $[\tau_{кр}]$  — допускаемое напряжение материала проволоки на кручение.

Необходимое число витков  $n$  при предварительных расчетах можно определить по следующим выражениям:

- 1) по требуемой жесткости пружины  $k_{кр}$  [2] —

$$n = k_{кр1} / k_{кр}, \quad (1)$$

где  $k_{кр1}$  — жесткость на кручение одного витка, Н · мм / град;

$k_{кр}$  — требуемая жесткость всей пружины, Н · мм / град:

$$k_{кр} = \frac{(M_2 - M_1)}{\Delta\alpha} = \frac{M_3}{\alpha_3}, \quad (2)$$

где  $M_3$  — предельный момент кручения при угле закручивания  $\alpha_3$ , при котором напряжения на изгиб  $\sigma_{изг}$  достигают предельного значения  $[\sigma_{изг}]$  (рисунок 1).

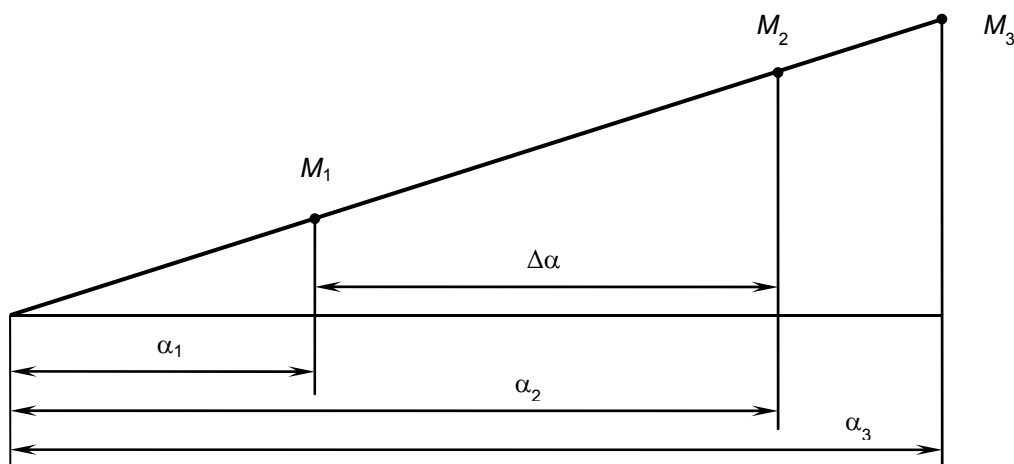


Рисунок 1. — Параметры пружины кручения

При этом рабочий ход пружины  $\Delta\alpha$  (град):

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2,$$

где  $\alpha_1$  — начальный (установочный) угол закручивания, соответствующий моменту  $M_1$ ;  
 $\alpha_2$  — максимальный рабочий угол закручивания, соответствующий моменту  $M_2$ .

Предельный угол закручивания  $\alpha_3$ , согласно [1, с. 252], рекомендуется принимать равным  $1,25\alpha_2$ , при котором напряжение на изгиб  $\sigma_3 = [\sigma_{изг}]$ . Число 1,25 рассматривается, очевидно, как коэффициент запаса угла закручивания пружины относительно максимального рабочего угла  $\alpha_2$ .

В результате получим:

$$n = \frac{k_{кр1}\Delta\alpha}{M_2 - M_1} = \frac{k_{кр1}\alpha_1}{M_1} = \frac{k_{кр1}\alpha_2}{M_2}. \quad (3)$$

Формула (3) требует предварительного определения жесткости всей пружины кручения  $k_{кр}$  и одного витка  $k_{кр1}$  (Н · мм / град), а также не учитывает параметры предельного нагружения пружины и ее прочностные свойства;

2) выражение для расчета числа витков по формуле [1]

$$n = \frac{54,5 \Delta\alpha d^3}{(M_2 - M_1)c}, \quad (4)$$

где  $c = D/d$  — индекс пружины, которое с учетом выражения (2) можно преобразовать к следующему виду:

$$n = \frac{54,5 d^4}{k_{кр} D}. \quad (5)$$

Выражение (5) также не учитывает прочностные свойства материалов пружин в их разнообразии;

3) приближительная формула для расчета числа витков по максимальному значению угла закручивания пружины [1, с. 252]:

$$n = \frac{1000 K_1 \alpha_2}{1,8c[\sigma_{изг}]}, \quad (6)$$

где  $K_1$  — коэффициент формы сечения и кривизны витков (поправочный коэффициент Ваая) [2]:

$$K_1 = \frac{4c-1}{4c-4} + \frac{0,615}{c}; \quad (7)$$

$[\sigma_{изг}]$  — допускаемое напряжение на изгиб, МПа (для пружин из стали 60С2  $[\sigma_{изг}] = 1\,200$  МПа [2]).

Формула (6) не учитывает предельные значения момента  $M_3$  или угла закручивания  $\alpha_3$ , соответствующие предельному напряжению на изгиб  $[\sigma_{изг}]$ , которые в реальности могут значительно отличаться у разных материалов, применяемых для изготовления пружин (таблица 1).

Т а б л и ц а 1. — Параметры некоторых марок пружинных сталей [3]

Марка стали	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Модуль сдвига $G$ , МПа	Модуль упругости материала пружины $E$ , МПа	Допускаемое напряжение на изгиб $\sigma_{изг}$ , МПа
12Х18Н10Т	510	68 500	181 000	320
ХН77ТЮР	730	78 300	196 000	450
60С2А	1 270	82 000	212 000	500
65Г	980	84 000	215 000	430
50ХФА	1 470	85 000	218 000	470

В силу вышеизложенного для предварительного расчета количества витков необходимо использовать выражение, учитывающее геометрические размеры пружины, параметры предельного нагружения с определенным запасом прочности и физико-механические свойства материала, из которых она изготовлена, допускаемое напряжение на изгиб  $[\sigma_{изг}]$  и модуль упругости  $E$ .

Согласно [2], жесткость пружины кручения

$$k_{кр} = 2,72 \cdot 10^{-4} \frac{E d^4}{D n}, \quad (8)$$

где  $E$  — модуль упругости материала пружины, МПа.

Приравняем выражения (2), (8) и выразим число витков:

$$n = 2,72 \cdot 10^{-4} \frac{E d^3 \alpha_3}{M_3 c}.$$

С учетом выражения для индекса пружины ( $i = D / d$ ) и выражения для диаметра проволоки [2]

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 M_3 K_1}{\pi [\sigma_{изг}]}} , \quad (9)$$

в результате после преобразований получим:

$$n = 2,77 \cdot 10^{-3} \frac{E K_1 \alpha_3}{[\sigma_{изг}] c}. \quad (10)$$

Детальное сравнение выражений (6) и (10) показывает, что в формуле (6) отношением (1 000 / 1,8) учтено осредненное значение модуля упругости  $E_{cp}$  материала:

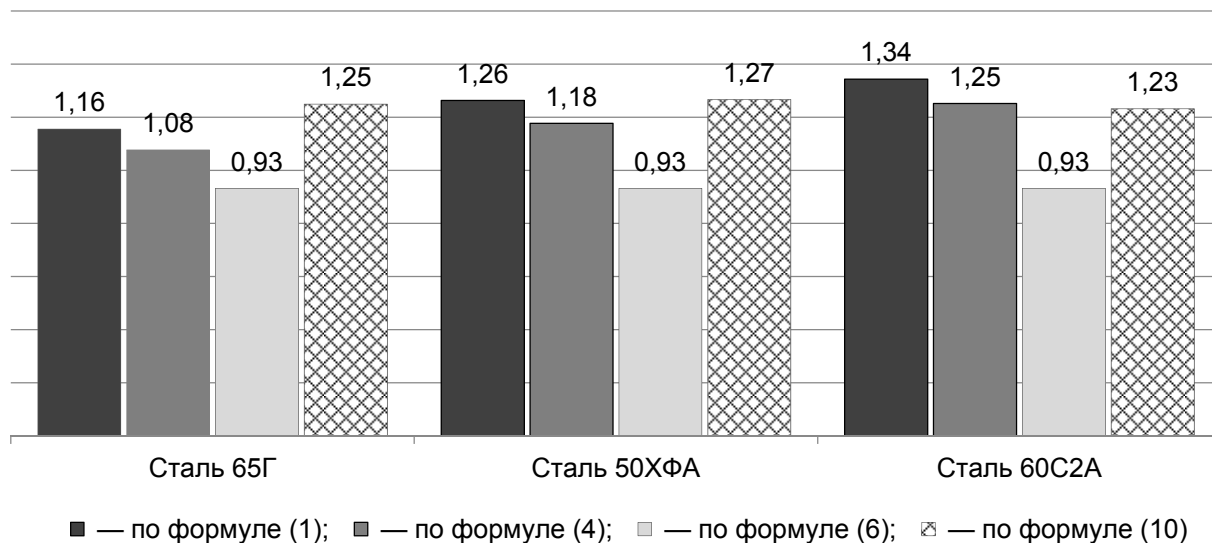
$$E_{cp} = \frac{1\,000}{1,8 \cdot 2,77 \cdot 10^{-3}} = 200\,562 \text{ МПа.}$$

С практической точки зрения важно, что предложенная формула (10) учитывает необходимое и достаточное число параметров — допустимое напряжение на изгиб  $[\sigma_{изг}]$  и модуль упругости материала пружины  $E$ , характеризующие физико-механические свойства материала пружины, а также показатель деформации — предельный угол закручивания  $\alpha_3$ . Геометрические размеры одного витка пружины учитываются величинами индекса пружины  $c$  и поправочного коэффициента  $K_1$ , определяемого значением индекса пружины по формуле (7).

**Результаты исследования и их обсуждение.** Для сравнения методов определения количества витков произведем расчет по формулам (1), (4), (6) и (10) для трех марок пружинной стали — 65Г, 50ХФА и 60С2А (таблица 2).

Т а б л и ц а 2. — Исходные данные и результаты расчетов по сравнению методов определения числа витков

Величина	Марка стали		
	65Г	50ХФА	60С2А
Установочный момент кручения $M_1$ , Н · мм	1 500		
Максимальный рабочий момент кручения $M_2$ , Н · мм	4 000		
Предельный момент закручивания $M_3$ , Н · мм	5 000		
Рабочий ход пружины $\Delta\alpha$ , град	30		
Требуемая жесткость пружины кручения $k_{кр}$ , Н · мм / град	100		
Установочный угол закручивания $\alpha_1$ , град	10		
Наибольший рабочий угол закручивания $\alpha_2$ , град	40		
Предельный угол закручивания $\alpha_3$ , град	50		
Диаметр проволоки минимальный $d_{min}$ , мм (по формуле (9))	4,6	4,4	4,3
Диаметр проволоки принятый $d$ , мм	5		
Средний диаметр пружины $D$ , мм	50		
Жесткость кручения одного витка $k_{кр1}$ , Н · мм / град	731		
Индекс пружины $c$	10,0		
Коэффициент формы сечения и кривизны витка $K_1$	1,145		
Расчетное число витков $n$ :			
по формуле (1)	8,8	8,8	8,8
по формуле (4)	8,2	8,2	8,2
по формуле (6)	7,1	6,5	6,1
по формуле (10)	9,5	8,8	8,1
Предельный угол закручивания $\alpha_3$ (град) при расчете числа витков:			
по формуле (1)	55	61	64
по формуле (4)	52	56	60
по формуле (6)	45	45	45
по формуле (10)	60	61	59



**Рисунок 2. — Коэффициент запаса угла закручивания пружины относительно заданного значения  $\alpha_3$  при расчете числа витков пружины рассмотренными способами**

В качестве критерия сравнения используем расчетную величину предельного угла закручивания:

$$\alpha_{3\text{расч}} = M_3 / k_{\text{кр}},$$

а также коэффициент запаса расчетного значения угла закручивания  $\alpha_3$  расчетного относительно заданного (см. таблицу 2):

$$K_\alpha = \alpha_{3\text{расч}} / \alpha_3.$$

Результаты расчетов показывают, что при учете прочностных характеристик материала, из которых изготовлена пружина, расчетное число витков  $n$  для близких по характеристикам материалов может существенно отличаться: при принятых значениях  $[\sigma_{\text{изг}}] = 430 \dots 500$  МПа и  $E = 212 \dots 215$  ГПа разница достигает 16 %.

Формулы (1) и (4) не учитывают прочностных свойств материала пружины. Формула (6) дает заниженное число витков, так как не учитывает предельное нагруженное состояние при моменте кручения  $M_3$ , при этом расчетный предельный угол закручивания на 7 % меньше заданного (рисунок 2).

Следует заметить, что зачастую из конструктивных соображений число витков  $n$  после расчета округляется в большую сторону, поэтому при силовом и проверочном расчетах необходимо уточнить значения кинематических, силовых и геометрических параметров с учетом принятого числа витков.

**Заключение.** Расчет числа витков по предлагаемой формуле (10) обеспечивает наиболее точное выполнение условия прочности при предельной нагрузке  $\sigma_3 \approx [\sigma_{\text{изг}}]$ . В то же время отклонение установочного момента от заданного для исследованных типов пружин составляет  $\Delta M_1 = -6 \dots +7$  %. Поэтому в случае, если требуется обеспечить строгое соответствие фактических моментов кручения заданным, то расчет целесообразно проводить для нескольких типов пружин кручения с последующим выбором пружины, обеспечивающей ближайшее к нулю значение отклонения момента от заданного.

**Список цитируемых источников**

1. *Анурьев, В. И.* Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. / В. И. Анурьев ; под ред. И. Н. Жестковой. — М. : Машиностроение, 2001. — Т. 3. — 864 с.
2. Арматура трубопроводная. Пружины винтовые цилиндрические. Методика расчета [Электронный ресурс] : СТ ЦКБА 044-2010 : утв. 29.09.2010. — ЗАО «НПФ «ЦКБА». — Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/data2/1/4293813/4293813956#i11783> . — Дата доступа: 03.02.2021.
3. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из специальных сталей и сплавов. Общие технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 50753-95. — Введ. 09.03.1995. — Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200026199> . — Дата доступа: 15.02.2021.

Поступила в редакцию 09.09.2021.

УДК 621.9

**А. Н. Жигалов**, кандидат технических наук, доцент; **И. А. Горавский**  
Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,  
225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНОСА ОСЕВОГО ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5, УПРОЧНЕННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

При использовании метода аэродинамического звукового упрочнения для повышения стойкости осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 при обработке стали 45 выявлено увеличение стойкости в 1,5...2,1 раза в зависимости от режимов обработки и максимально допустимого износа по задней поверхности.

**Ключевые слова:** осевой фрезерный инструмент; стойкость; износ; метод аэродинамического звукового упрочнения; режимы обработки.

Рис. 13. Табл. 3. Библиогр.: 9 назв.

**A. N. Jigalov**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor; **I. A. Goravskii**  
Educational institution “Baranovichi State University”, 21 Voykova Str.,  
225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, + 375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE WEAR OF AN AXIAL MILLING TOOL MADE OF HIGH-SPEED STEEL R6M5, HARDENED BY AERODYNAMIC SOUND METHOD

When using the aerodynamic sound hardening method of increasing durability increase of an axial milling tool made of high-speed steel R6M5 when processing steel 45, an increase in 1.5...2.1 times was revealed, depending on the processing modes and the maximum allowable wear on the rear surface.

**Key words:** axial milling tool; durability; wear; method of aerodynamic sound hardening; processing modes.

Fig. 13. Table. 3. Ref.: 9 titles.

**Введение.** Осевой фрезерный инструмент из быстрорежущей стали Р6М5 широко применяется в машиностроении для обработки контурных уступов и выемок, поверхностей, расположенных под прямым углом по отношению друг к другу, канавок и прочих поверхностей деталей из различных металлов. Но такой инструмент имеет один существенный недостаток — низкую стойкость, т. е. продолжительность резания новой или переточенной фрезой до ее отказа или до достижения предельно допустимого износа фрезы [1]. Стойкость фрезы является одним из основных технологических показателей эффективности процесса резания осевым фрезерным инструментом.

Разработанный метод аэродинамического звукового упрочнения (далее — АДУ), способный повысить ударную вязкость при сохранении высокой твердости до 65 HRC, оказывает положительное влияние на повышение стойкости инструмента, работающего при процессах прерывистого резания. Метод АДУ основан на принципах изменения структуры упрочняемого изделия за счет воздействия энергии резонансных волн в звуковом спектре частот [2—4]. Осевой фрезерный инструмент из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненный

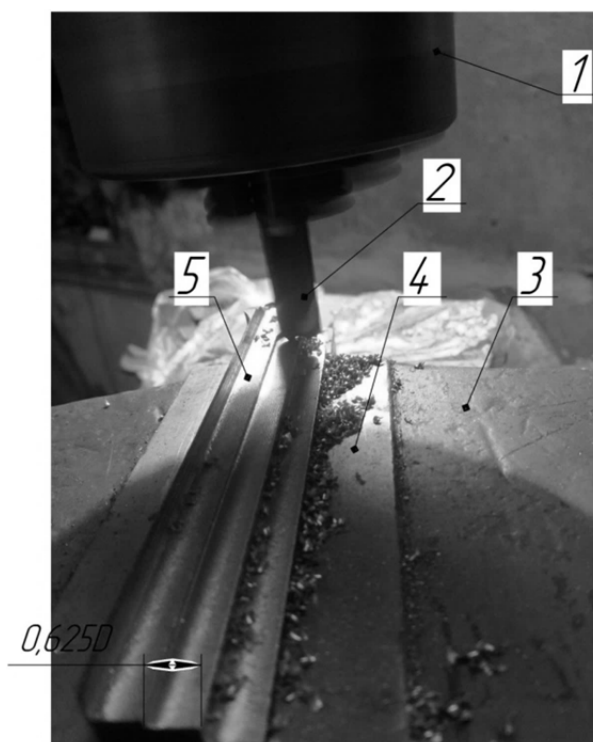


АДУ, не исследован, в связи с чем актуальным является проведение исследований влияния режимов резания на износ осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного АДУ.

**Материалы и методы исследования.** Исследованию подвергали концевые фрезы из быстрорежущей стали Р6М5 диаметрами 8 и 12 мм с двумя режущими зубьями (ГОСТ 17024-82). Фрезы разделялись на две группы, одну из которой подвергали упрочнению методом АДУ, а другую оставляли без упрочнения. Упрочнение фрез осуществлялось по методике, изложенной в [5]. Испытания фрез на износ проводили на вертикально-фрезерном станке модели 675. Фрезы закреплялись в цанговом патроне. Фрезерованию подвергались прямоугольные заготовки размером  $100 \times 20$  и  $300 \times 50$  мм из стали 45 твердостью 187...207 НВ (ГОСТ 1050), зажимаемых в тисках универсальных (рисунок 1).

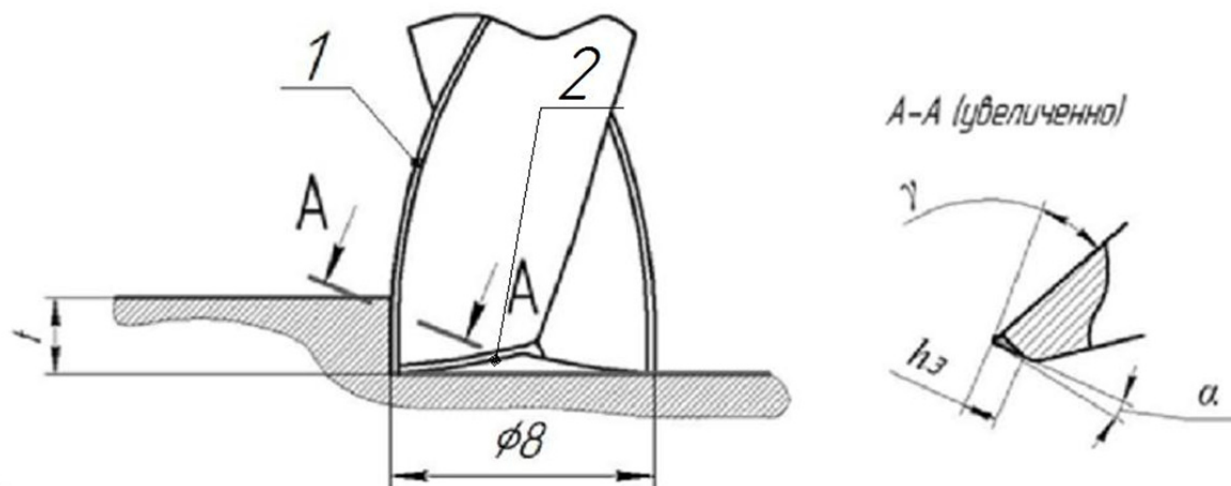
Обработка осуществлялась методом попутного фрезерования — движение подачи совпадает с направлением вращения фрезы вокруг своей оси. Ширина фрезерования  $H$  составляла  $0,625D$  мм. Режимы резания изменялись в следующих диапазонах: скорость резания  $v = 12,56...20,1$  м/мин, подача на зуб  $s_z = 0,02...0,0334$  мм/зуб, глубина фрезерования  $t = 0,5...2,1$  мм. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости применялся 5 %-ный раствор эмульсола в воде с расходом 6...8 л/мин. За критерий затупления принимался износ по задней поверхности  $h_3$ , измерение которого осуществлялось следующим образом.

На рисунке 2 показана схема резания концевой фрезой с величиной износа по задней поверхности  $h_3$ .



1 — цанговый патрон; 2 — концевая фреза; 3 — тиски универсальные; 4 — рабочие губки тисков; 5 — прямоугольная заготовка

**Рисунок 1. — Схема фрезерования заготовок из стали 45 концевой фрезой на фрезерном станке модели 675**



1 — режущая кромка главного лезвия; 2 — режущая кромка вспомогательного лезвия

**Рисунок 2. — Схема резания концевой фрезой**

Так как режущий зуб фрезы имеет криволинейную режущую кромку  $1$  главного лезвия, то при измерении износа по задней поверхности  $h_3$  в направлении режущей кромки  $1$  (см. рисунок 2) будет присутствовать погрешность в измерении из-за потери базовой точки измерения износа, находящейся на режущей кромке главного лезвия. Кроме того, погрешность измерения будет накапливаться из-за происходящего одновременного износа режущих кромок как главного, так и вспомогательного лезвия.

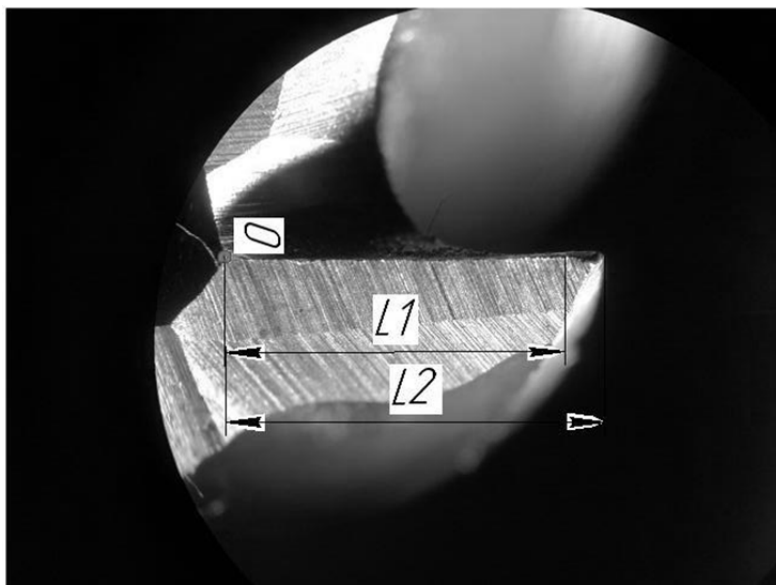
В связи с этим предложено замеры износа по задней поверхности  $h_3$  осуществлять по линии режущей кромки вспомогательного лезвия (рисунок 3) относительно базовой точки, являющейся крайней точкой, расположенной на задней режущей кромке вспомогательного лезвия и наиболее приближенной к оси вращения фрезы (на рисунке 3 точка  $O$ ), которая не подвержена износу. Тогда, согласно рисунку 3, величина износа по задней поверхности  $h_3$  будет равна разнице расстояний между длинами режущих кромок вспомогательного лезвия до износа  $L_2$  и после износа  $L_1$ :

$$h_3 = L_2 - L_1. \quad (1)$$

Износ по задней поверхности  $h_3$  замерялся через каждые 600 мм пути резания фрезы или через 15...20 мин обработки на микроскопе Galileomicroscan HV1 AC с точностью измерений 0,001 мм.

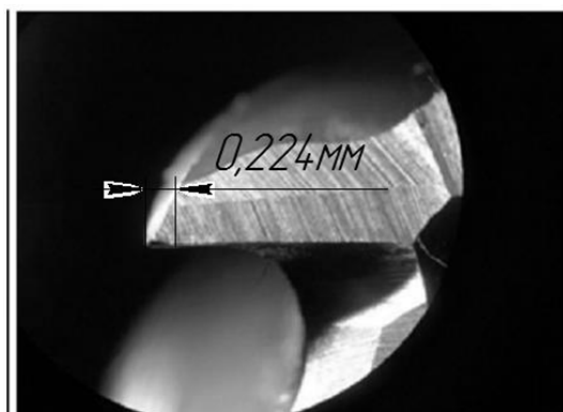
Сначала проводились исследования однофакторного влияния режимов резания при обработке фрезами, упрочненными аэродинамическим звуковым методом, на износ по задней поверхности зуба фрезы. Концевыми фрезами из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 12 мм,  $z = 5$ , из которых две фрезы были упрочнены методом АДУ в течение 3,5 мин на резонансной частоте 148 Гц с предварительным нагревом их до 260 °С и выдержкой при такой температуре в нагревательной печи в течение 60 мин, а две — без упрочнения, производили фрезерование образцов размером 100 × 20 × 60 мм из стали 45 на фрезерном станке модели 675 на режимах: скорость резания — 15,072 м / мин, подача на зуб — 0,032 мм / зуб, глубина резания — 1,0 мм, подача стола станка — 64 мм / мин, ширина фрезерования — 7 мм.

На рисунке 4 показаны съемки износа по задней поверхности  $h_3$  на зубе фрезы, неупрочненной ( $a$ ) и упрочненной АДУ ( $b$ ), от времени резания  $\tau$  на указанных режимах резания.

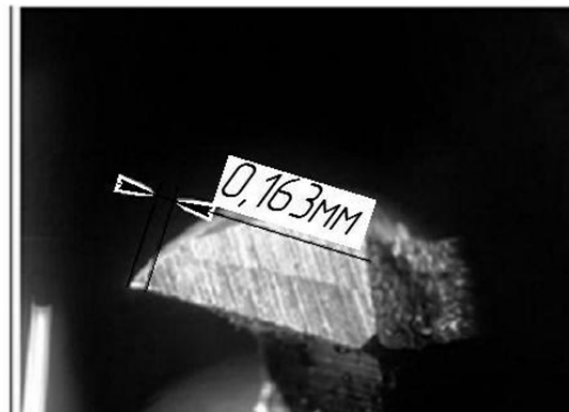


$L_1$  — длина режущей кромки вспомогательного лезвия фрезы после износа;  $L_2$  — длина режущей кромки вспомогательного лезвия фрезы до износа

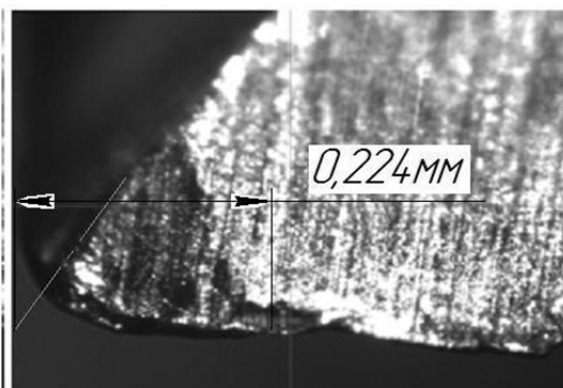
**Рисунок 3. — Вид концевой фрезой со стороны вспомогательного лезвия фрезы**



$h_3 = 0,224$  мм,  $\tau = 15$  мин (увеличение  $\times 5$ )

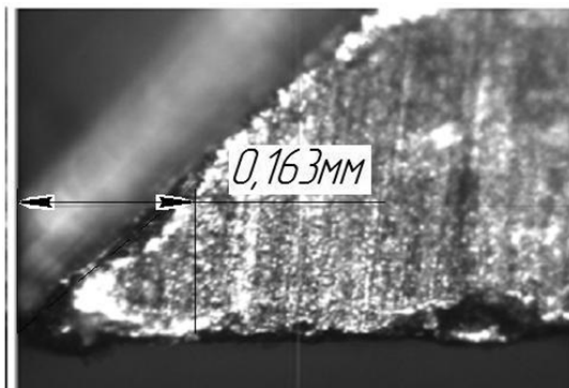


$h_3 = 0,163$  мм,  $\tau = 15$  мин (увеличение  $\times 5$ )



$h_3 = 0,224$  мм,  $\tau = 15$  мин (увеличение  $\times 30$ )

а)



$h_3 = 0,163$  мм,  $\tau = 15$  мин (увеличение  $\times 30$ )

б)

**Рисунок 4. — Износ по задней поверхности  $h_3$  зуба фрезы из стали Р6М5 от времени резания  $\tau$ : а — неупрочненной; б — упрочненной АДУ**



$h_3 = 0,279$  мм,  $\tau = 30$  мин (увеличение  $\times 20$ )



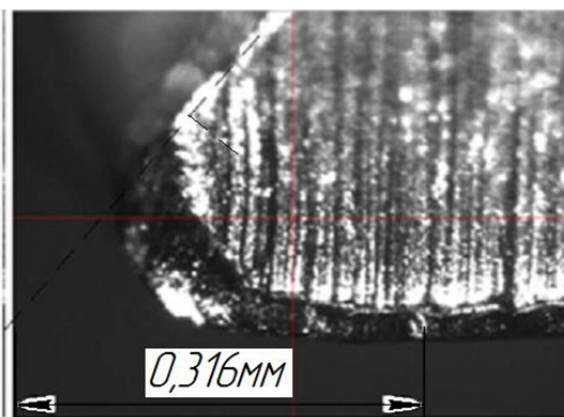
$h_3 = 0,212$  мм,  $\tau = 30$  мин (увеличение  $\times 20$ )



$h_3 = 0,298$  мм,  $\tau = 50$  мин (увеличение  $\times 20$ )

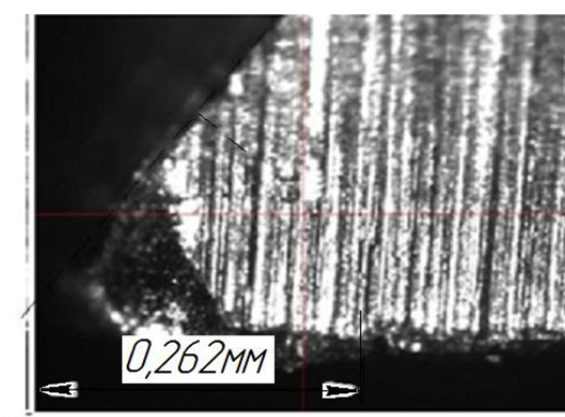


$h_3 = 0,236$  мм,  $\tau = 50$  мин (увеличение  $\times 20$ )



$h_3 = 0,316$  мм,  $\tau = 55$  мин (увеличение  $\times 30$ )

а)



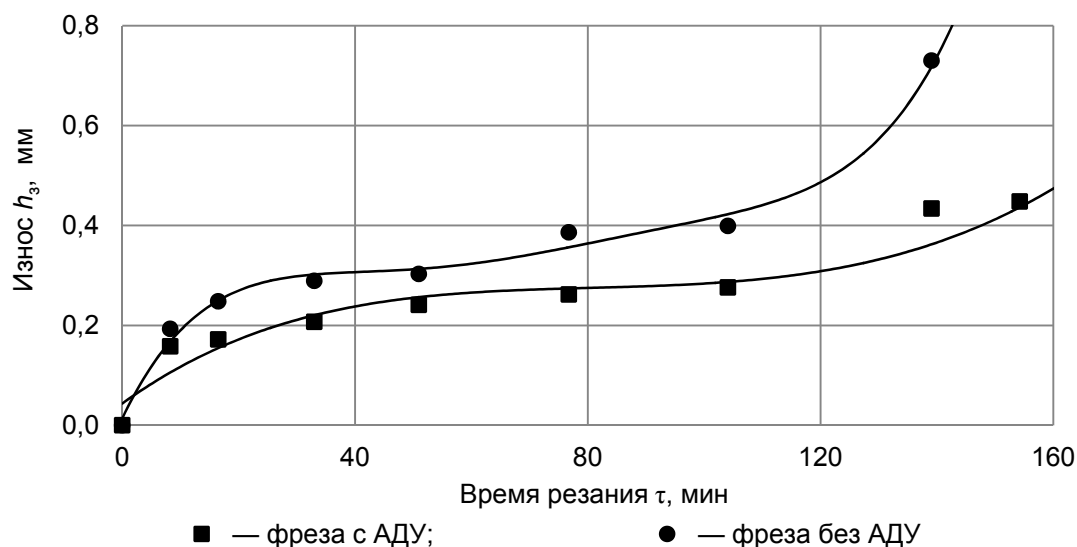
$h_3 = 0,262$  мм,  $\tau = 55$  мин (увеличение  $\times 30$ )

б)

Окончание рисунка 4

**Результаты исследования и их обсуждение.** Результаты износа по задней поверхности  $h_3$  зуба фрезы быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 12 мм, неупрочненных и упрочненных АДУ, от времени резания  $\tau$  приведены на рисунке 5.

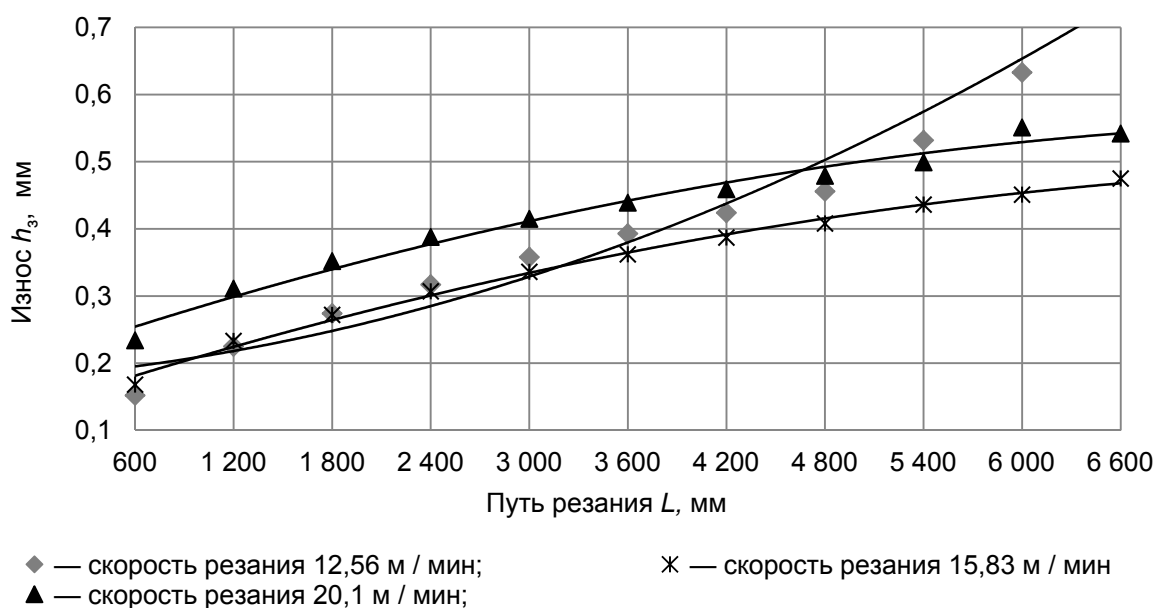
Анализ зависимостей рисунка 5 показывает, что при фрезеровании образцов из стали 45 износ  $h_3 = 0,4$  мм для фрезы диаметром 12 мм, упрочненной методом АДУ, наступает при  $\tau = 150$  мин, а без упрочнения — при  $\tau = 95$  мин, т. е. стойкость повышается в 1,58 раза [6; 7].



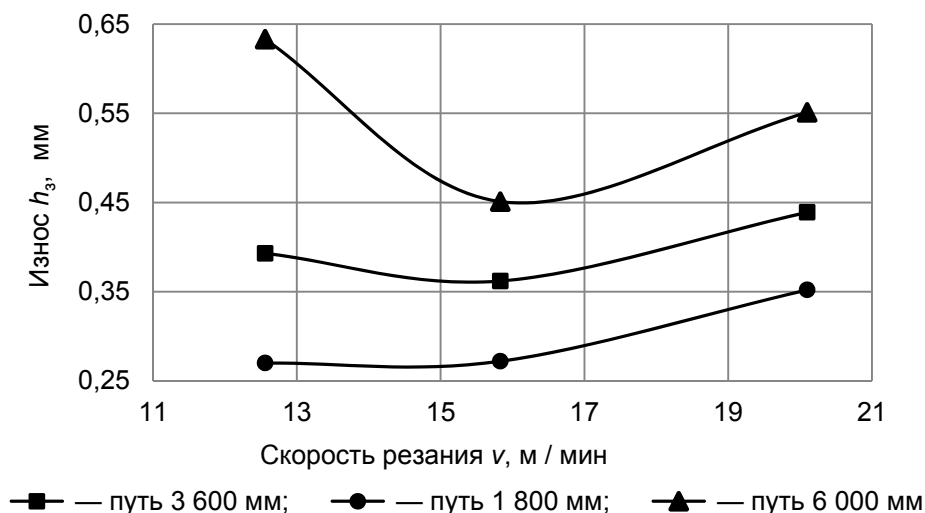
**Рисунок 5.** — Зависимости износа  $h_3$  по задней поверхности зуба фрез диаметром 12 мм,  $z = 5$  из Р6М5, неупрочненных и упрочненных аэродинамическим звуковым методом, от времени резания  $\tau$  образцов из стали 45 на режимах:  $v = 15,072$  м / мин,  $s_z = 0,032$  мм / зуб,  $t = 1,0$  мм

На рисунках 6 и 7 приведены зависимости износа  $h_3$  по задней поверхности зуба фрезы диаметром 8 мм из Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом, при фрезеровании образцов из стали 45 от влияния одного из режимов резания  $v$ ,  $s_z$ ,  $t$ .

Анализ влияния скорости резания на износ  $h_3$  по задней поверхности зуба фрезы из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненной методом АДУ, при фрезеровании образцов из стали 45 показывает (см. рисунки 6 и 7), что в начале обработки до пути резания  $L = 3\ 000$  мм при увеличении скорости резания с 12,56 до 20,1 м / мин величина износа  $h_3$  увеличивается. При дальнейшей обработке происходит увеличение износа  $h_3$  при меньших скоростях резания ( $v = 12,56$  м / мин) по сравнению со скоростями резания  $v = 15,83$  м / мин и  $v = 20,1$  м / мин.



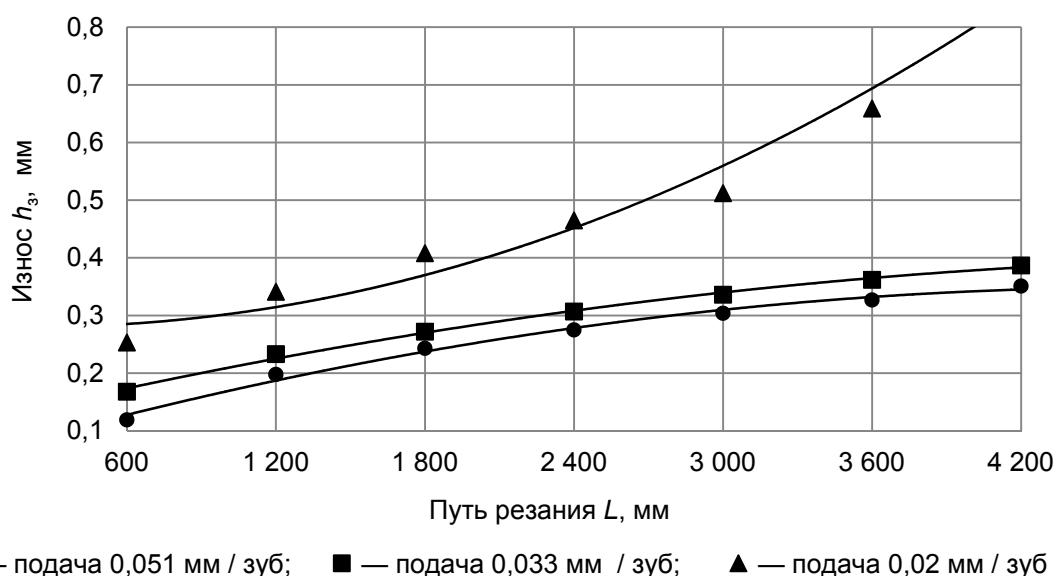
**Рисунок 6.** — Зависимости износа  $h_3$  зуба фрезы диаметром 8 мм из Р6М5 с АДУ от пути резания при фрезеровании стали 45 на скоростях резания  $v$ : 12,56; 15,83; 20,1 м / мин ( $s_z = 0,033$  мм / зуб,  $t = 1,3$  мм)



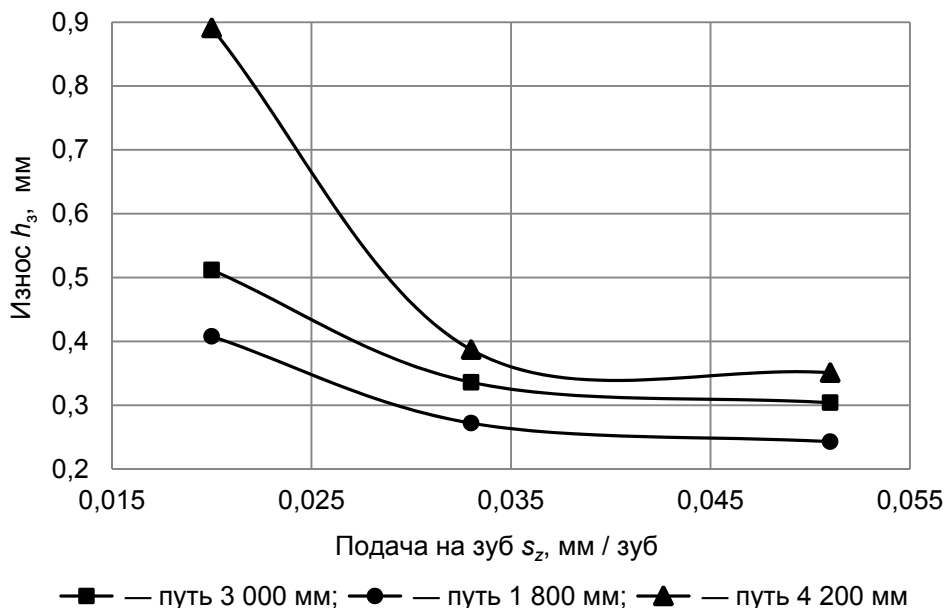
**Рисунок 7.** — Зависимости износа  $h_3$  зуба фрезы диаметром 8 мм из Р6М5 с АДУ при фрезеровании стали 45 от скорости резания при путях резания  $L$ : 1 800; 3 600; 6 000 мм ( $s_z = 0,033$  мм / зуб,  $t = 1,3$  мм)

Анализ зависимостей (см. рисунок 7) показывает, что влияние скорости резания на износ  $h_3$  по задней поверхности зуба фрезы из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом, носит экстремальный характер. Практически на любом промежутке резания при скорости  $v = 15,83$  м / мин наблюдается минимальный износ зуба фрезы.

Из рисунков 8 и 9 следует, что при увеличении подачи на зуб износ  $h_3$  зуба фрезы из стали Р6М5, упрочненной методом АДУ, при фрезеровании образцов из стали 45 уменьшается, при этом экстремума износа от подачи на зуб не наблюдается, а также при увеличении подачи с 0,02 до 0,033 мм / зуб интенсивность снижения износа значительно больше, чем при увеличении подачи с 0,033 до 0,051 мм / зуб.

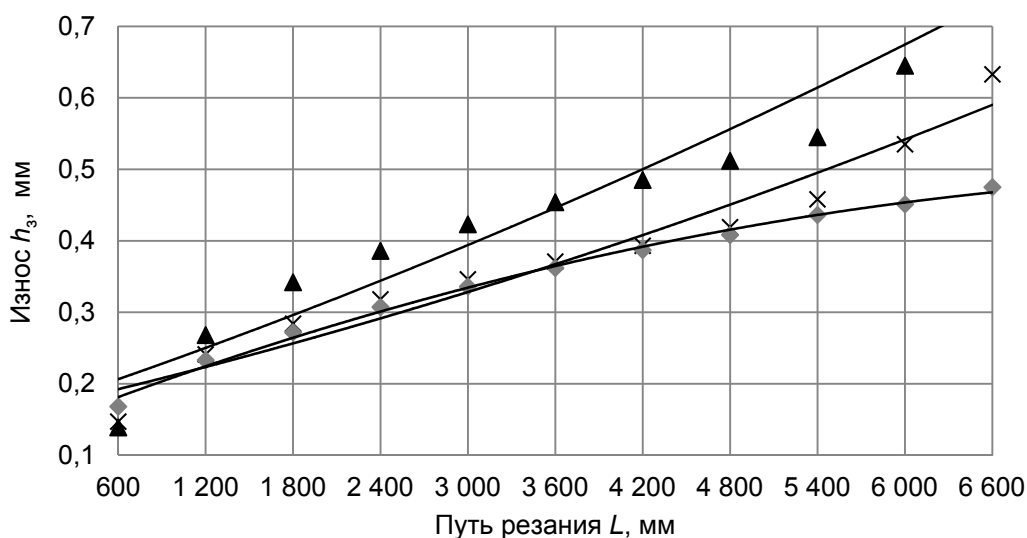


**Рисунок 8.** — Зависимости износа  $h_3$  зуба фрезы диаметром 8 мм из Р6М5 с АДУ при фрезеровании стали 45 при подачах на зуб  $s_z$ : 0,02; 0,033; 0,051 мм / зуб ( $v = 15,83$  м / мин,  $t = 1,3$  мм)



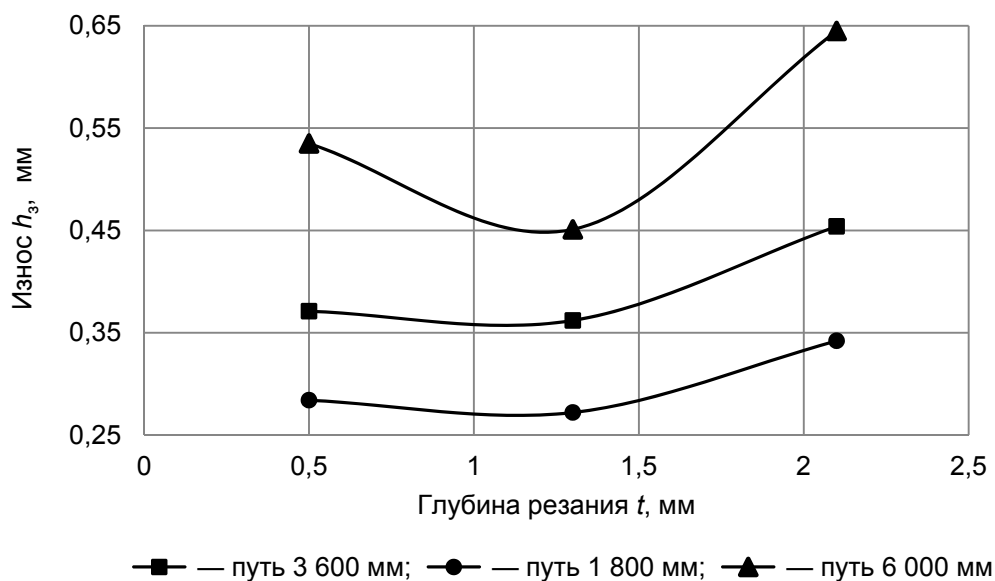
**Рисунок 9.** — Зависимости износа  $h_3$  зуба фрезы диаметром 8 мм из Р6М5 с АДУ при фрезеровании стали 45 от поддачи  $s_z$  при путях резания  $L$ : 1 800; 3 000; 4 200 мм ( $v = 15,83$  м / мин,  $t = 1,3$  мм)

Анализ влияния глубины резания на износ  $h_3$  по задней поверхности зуба фрезы из Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом, при фрезеровании образцов из стали (рисунки 10 и 11) показывает, что на всех глубинах резания при увеличении пути резания наблюдается износ зуба фрезы с различной интенсивностью. При небольших глубинах резания (до  $t = 1,3$  мм) при увеличении глубины резания происходит снижение износа зуба фрезы, а при глубинах резания свыше 1,3 мм при увеличении глубины резания происходит увеличение износа зуба фрезы. Влияние глубины резания на износ носит экстремальный характер.



× — глубина резания 0,5 мм; ◆ — глубина резания 1,3 мм; ▲ — глубина резания 2,1 мм

**Рисунок 10.** — Зависимости износа  $h_3$  зуба фрезы диаметром 8 мм из Р6М5 с АДУ при фрезеровании стали 45 при глубинах резания  $t$ : 0,5; 1,3; 2,1 мм ( $v = 15,83$  м / мин,  $s_z = 0,033$  мм / зуб)



**Рисунок 11.** — Зависимости износа  $h_3$  зуба фрезы диаметром 8 мм из Р6М5 с АДУ при фрезеровании стали 45 от глубины резания  $t$  при путях резания  $L$ : 1 800; 3 600; 6 000 мм ( $v = 15,83$  м / мин,  $s_z = 0,033$  мм / зуб)

Таким образом, при обработке фрезами из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненных методом АДУ, явно прослеживается наличие оптимальных режимов резания ( $v$ ,  $s_z$ ,  $t$ ), при которых присутствует минимальный износ зуба фрезы. Определение таких оптимальных режимов резания позволит дополнительно повысить стойкость фрез из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненных методом АДУ.

Проведены экспериментальные исследования износа фрез по методике, изложенной в работе [8], которая позволяет наряду с небольшим количеством опытов (для трех параметров — семь опытов) получать расширенную информацию по взаимному влиянию каждого из исследуемых параметров, а также комплексному влиянию, на результирующие показатели износа фрез. Согласно методике определения износа в качестве количественной оценки выбиралась величина износа режущего лезвия по задней поверхности  $h_3$  от пути резания  $L$  в виде степенной функции

$$h_3 = aL^n, \quad (2)$$

где  $a$  — коэффициент, характеризующий абсолютную величину износа от пути резания;

$n$  — коэффициент, представляющий собой показатель интенсивности износа.

Путем логарифмирования зависимости (1) коэффициенты  $a$  и  $n$  определяются следующим образом:

$$a = \frac{h_{3_i}}{\tau_i^n} + \frac{h_{3_1}}{\tau_1^n}, \quad n = \operatorname{tg} \alpha = \frac{h_{3_i} - h_{3_1}}{\tau_i - \tau_1}, \quad (3)$$

где  $h_{3_i}$  и  $h_{3_1}$  — значения износа в логарифмической системе координат в  $i$ -й и первой точках соответственно;

$\tau_i$  и  $\tau_1$  — значения времени в логарифмической системе координат в  $i$ -й и первой точках соответственно.



Проведенные однофакторные исследования показали, что скорость резания  $v$ , подача на зуб  $s_z$  и глубина резания  $t$  оказывают существенное влияние на износ концевых фрез из быстрорежущей стали P6M5 с АДУ.

С учетом этого проведен полнофакторный эксперимент, состоящий из семи опытов по трем режимам резания ( $v$ ,  $s$  и  $t$ ). Концевыми фрезами диаметром 8,0 мм из P6M5 без упрочнения и с АДУ фрезеровали заготовки из стали 45. Для каждого режима резания назначались пределы варьирования, определенные из предварительных исследований и рекомендаций литературы, с учетом возможности установки на станке реальных режимов резания, которые представлены в таблице 1.

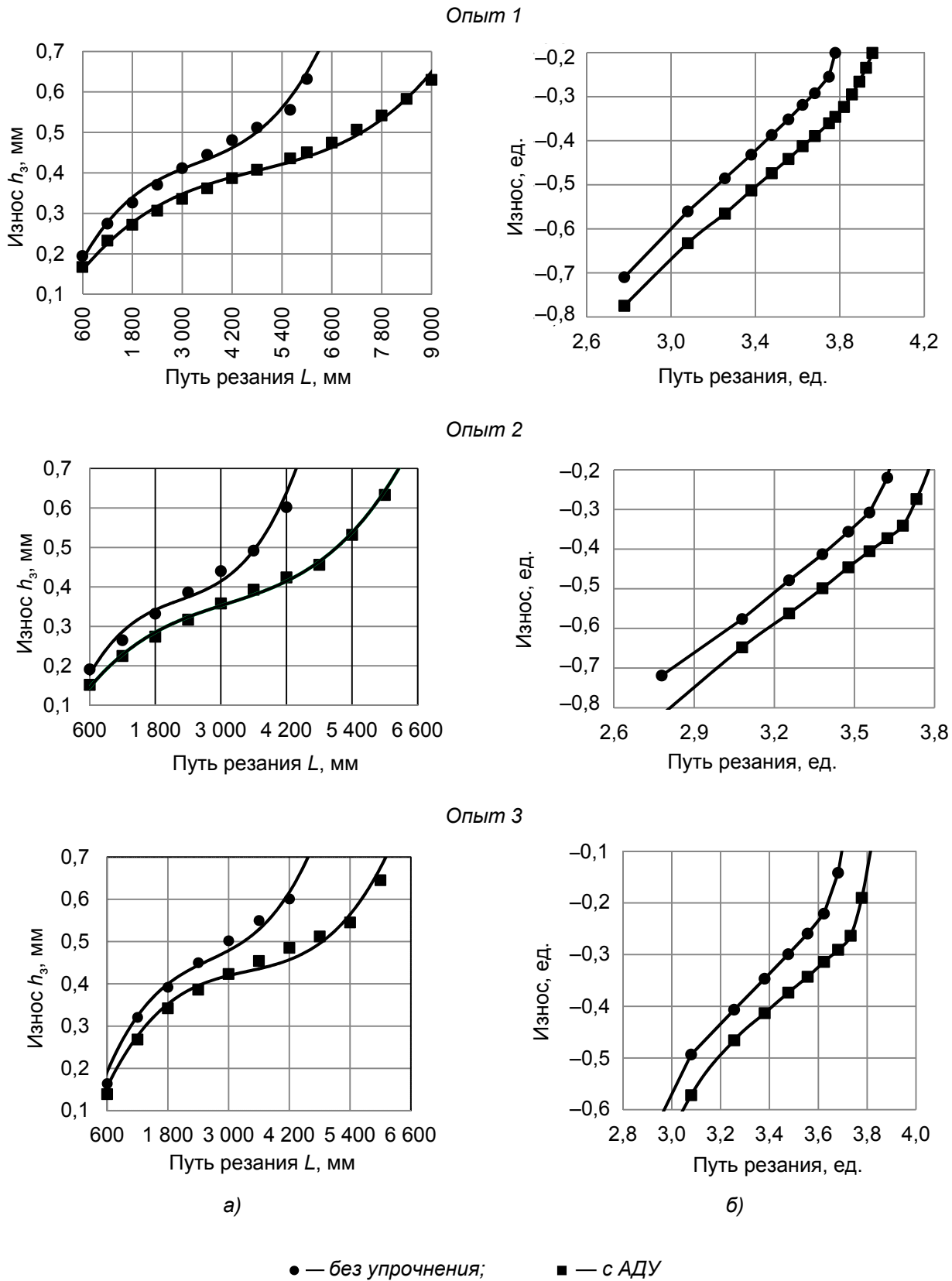
Значение износа  $h_3$  на зубе бралось по результатам замеров на трех фрезах, по которым определялась величина среднего значения износа  $h_3$ . При выходе значения замера за 20 % от среднего арифметического значения из трех замеров такое значение исключалось из расчетов. Замеры износа по задней поверхности  $h_3$  производились через 600 мм резания на инструментальном стереоскопическом микроскопе GalileomicroskanHV1 AC.

После проведенных семи опытов от  $v$ ,  $s_z$  и  $t$  по матрице таблицы 1 для каждого опыта строились графики изменения износа по задней поверхности  $h_3$  от пути резания  $L$  для зоны устоявшегося резания в абсолютной системе. Затем строились графики износа от пути резания в логарифмической системе по десятичному логарифму. Зависимости представлены на рисунке 12.

Графики (см. рисунок 12) обрабатывались на основании рекомендаций [4; 8]. На графиках, построенных в логарифмической системе, замерялись значения координат для начальной и конечной точек, между которыми соблюдалась прямолинейность линии. Например, для опыта № 7 (см. рисунок 12): в логарифмической системе координаты кривой, соответствующей неупрочненной фрезе, для второй точки  $h_{32} = -0,4425$  и  $L_2 = 3,0792$ ; для седьмой точки  $h_{37} = -0,2434$  и  $L_7 = 3,6233$ . Затем на графиках в абсолютной системе определялись координаты для аналогичных точек из графиков в логарифмической системе:  $h_{32} = 0,361$ ;  $L_2 = 1200$ ;  $h_7 = 0,571$ ;  $L_7 = 4\ 200$ . Для упрочненной фрезы: в логарифмической системе —  $h_{32} = -0,5072$ ,  $L_2 = 3,0792$ ,  $h_{310} = -0,2832$ ,  $L_{10} = 3,7782$ ; в абсолютной системе —  $h_{32} = 0,311$ ,  $L_2 = 1200$ ,  $h_{10} = 0,521$ ,  $L_{10} = 6\ 000$ . По начальным и конечным координатам прямолинейных частей графиков в логарифмической и абсолютной системах рассчитывались по (3) коэффициенты  $a$ ,  $n$ , а затем по (2) зависимости износа по задней поверхности  $h_3$ . Результаты координат для всех опытов сведены в таблице 2.

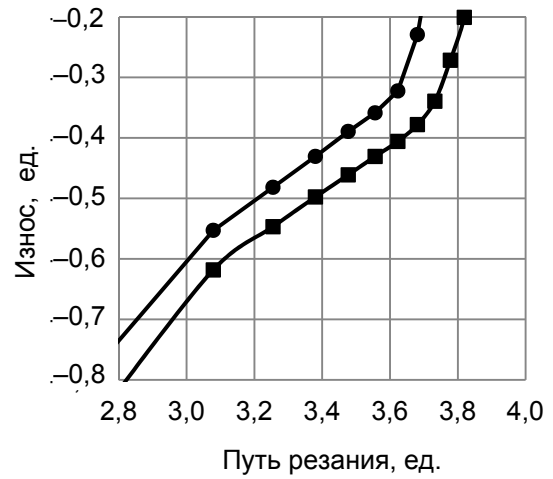
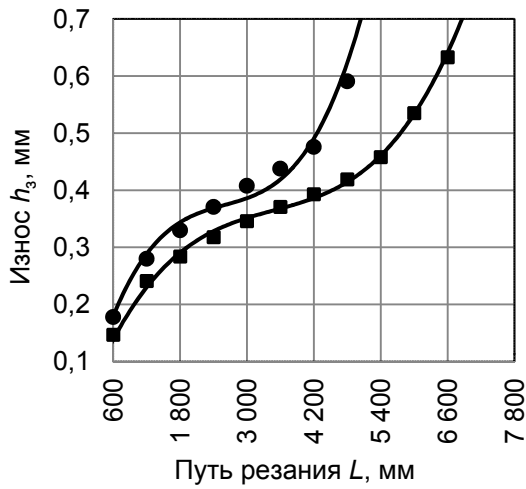
Т а б л и ц а 1. — Режимы резания при фрезеровании заготовок из стали 45 концевыми фрезами из быстрорежущей стали P6M5 без упрочнения и с АДУ

Номер опыта	Скорость резания $v$ , м / мин	Подача на зуб $s_z$ , мм / зуб	Глубина фрезерования $t$ , мм	Число оборотов фрезы $n_f$ , об. / мин	Подача стола $s_{ст}$ , мм / об
1	15,83	0,0334	1,3	630	42
2	12,56	0,033	1,3	500	33
3	15,83	0,0334	2,1	630	42
4	15,83	0,0334	0,5	630	42
5	15,83	0,02	1,3	630	26
6	15,83	0,051	1,3	630	64
7	20,10	0,033	1,3	800	52

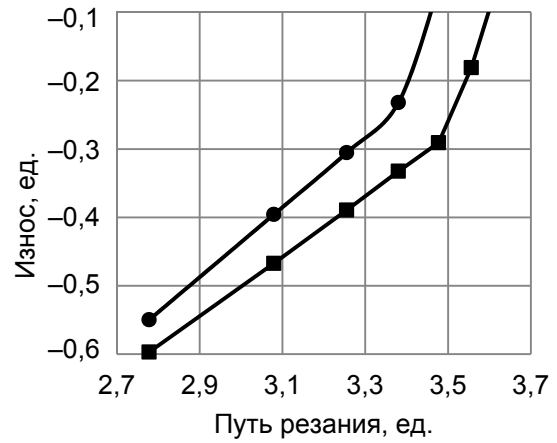
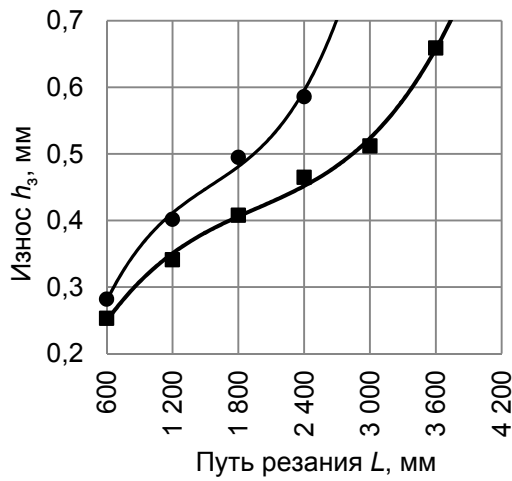


**Рисунок 12. — Зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  концевых фрез из Р6М5 без упрочнения и с АДУ от пути резания при фрезеровании стали 45: а — в абсолютной системе; б — в логарифмической системе**

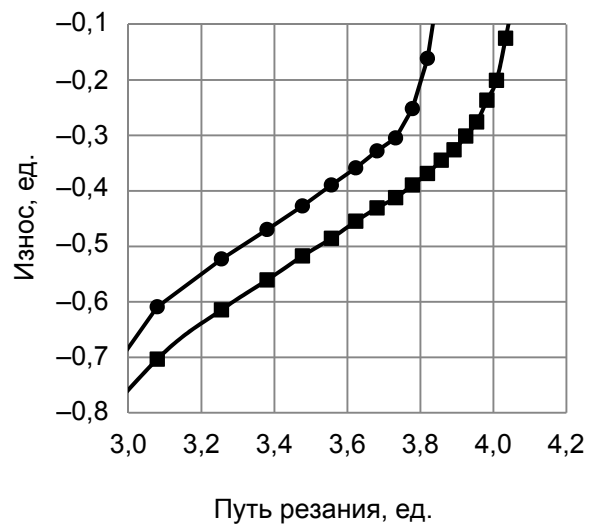
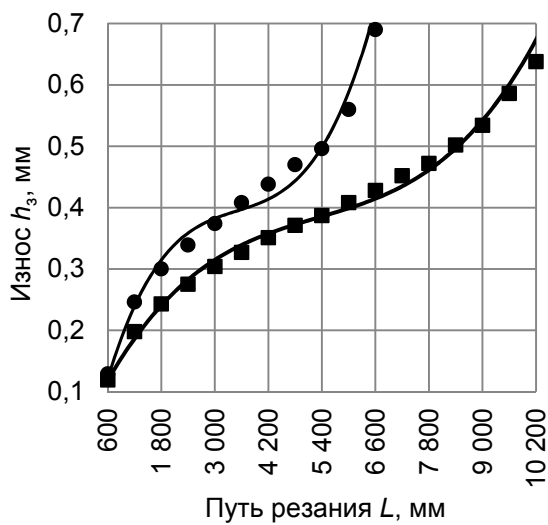
Опыт 4



Опыт 5



Опыт 6

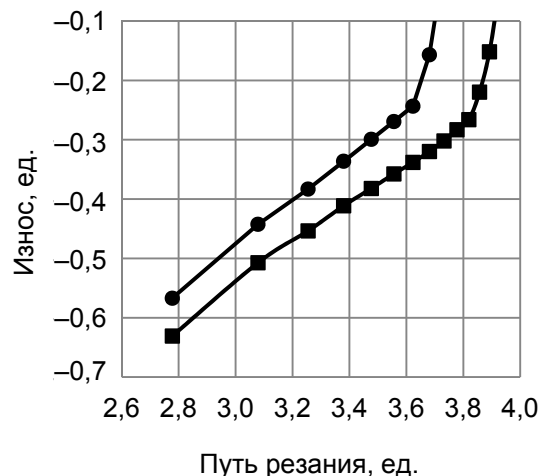
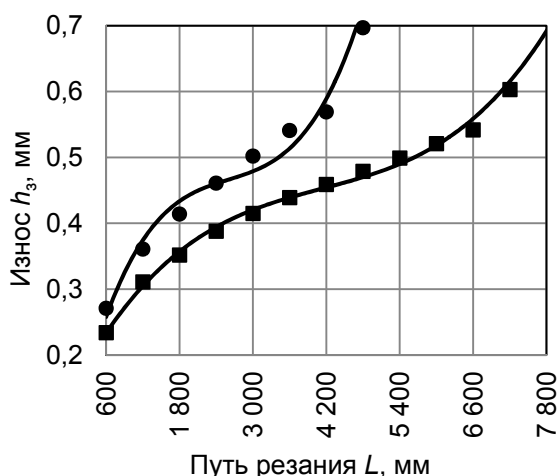


а)

б)

Продолжение рисунка 12

Опыт 7



Окончание рисунка 12

После обработки экспериментальных данных (таблица 2) по (2) получены зависимости износа  $h_3$  от пути резания  $L$  в виде степенных функций, значения которых приведены в таблице 3.

Экспериментальные кривые и зависимости, построенные по формулам таблицы 3, износа по задней поверхности  $h_3$  от пути резания  $L$  для концевых фрез из быстрорежущей стали Р6М5 при фрезеровании заготовок из стали 45 на различных режимах резания представлены на рисунке 13.

Т а б л и ц а 2. — Результаты расчетов коэффициентов для зависимостей износа от времени и коэффициентов повышения стойкости фрез диаметром 8 мм из Р6М5

Координаты	Номер точки		$h_{31}$	$h_{3i}$	$L_1$	$L_i$	$n_0$	$a$
<b>Опыт 1</b>								
<i>Фреза неупрочненная</i>								
Логарифмические	2	9	-0,5607	-0,2526	3,0792	3,7482	<b>0,460</b>	
Абсолютные	2	9	0,275	0,556	1 200	5 600		<b>0,01</b>
<i>Фреза, упрочненная АДУ</i>								
Логарифмические	2	10	-0,6326	-0,3458	3,0792	3,7782	<b>0,41</b>	
Абсолютные	2	10	0,233	0,451	1 200	6 000		<b>0,013</b>
<b>Опыт 2</b>								
<i>Фреза неупрочненная</i>								
Логарифмические	2	6	-0,5768	-0,3080	3,0792	3,5563	<b>0,563</b>	
Абсолютные	2	6	0,265	0,492	1 200	3 600		<b>0,005</b>
<i>Фреза, упрочненная АДУ</i>								
Логарифмические	2	8	-0,6478	-0,3410	3,0792	3,6812	<b>0,510</b>	
Абсолютные	2	8	0,222	0,452	1 200	4 800		<b>0,006</b>

Окончание таблицы 2

Координаты	Номер точки		$h_{31}$	$h_{3i}$	$L_1$	$L_i$	$n_0$	$a$
<b>Опыт 3</b>								
<i>Фреза неупрочненная</i>								
Логарифмические	2	7	-0,4935	-0,2211	3,0792	3,6232	<b>0,501</b>	
Абсолютные	2	7	0,321	0,601	1 200	4 200		<b>0,009</b>
<i>Фреза, упрочненная АДУ</i>								
Логарифмические	3	9	-0,4660	-0,2636	2,6956	3,1727	<b>0,424</b>	
Абсолютные	3	9	0,342	0,545	1 800	5 400		<b>0,014</b>
<b>Опыт 4</b>								
<i>Фреза неупрочненная</i>								
Логарифмические	2	7	-0,5528	-0,3224	3,0792	3,6232	<b>0,424</b>	
Абсолютные	2	7	0,280	0,476	1 200	4 200		<b>0,014</b>
<i>Фреза, упрочненная АДУ</i>								
Логарифмические	2	8	-0,6180	-0,3778	3,0792	3,6812	<b>0,399</b>	
Абсолютные	2	8	0,241	0,419	1 200	4 800		<b>0,014</b>
<b>Опыт 5</b>								
<i>Фреза неупрочненная</i>								
Логарифмические	1	4	-0,5498	-0,2321	2,7782	3,3802	<b>0,528</b>	
Абсолютные	1	4	0,282	0,586	600	2 400		<b>0,010</b>
<i>Фреза, упрочненная АДУ</i>								
Логарифмические	1	5	-0,5969	-0,2907	2,7782	3,4771	<b>0,438</b>	
Абсолютные	1	5	0,253	0,512	600	3 000		<b>0,015</b>
<b>Опыт 6</b>								
<i>Фреза неупрочненная</i>								
Логарифмические	2	9	-0,6091	-0,3045	3,0792	3,7324	<b>0,466</b>	
Абсолютные	2	9	0,246	0,496	1 200	5 400		<b>0,009</b>
<i>Фреза, упрочненная АДУ</i>								
Логарифмические	3	11	-0,6144	-0,3686	3,2553	3,8195	<b>0,436</b>	
Абсолютные	3	11	0,243	0,428	1 800	6 600		<b>0,009</b>
<b>Опыт 7</b>								
<i>Фреза неупрочненная</i>								
Логарифмические	2	7	-0,4425	-0,2449	3,0792	3,6232	<b>0,363</b>	
Абсолютные	2	7	0,361	0,569	1 200	4 200		<b>0,027</b>
<i>Фреза, упрочненная АДУ</i>								
Логарифмические	2	10	-0,5072	-0,2832	3,0792	3,7782	<b>0,321</b>	
Абсолютные	2	10	0,311	0,521	1 200	6 000		<b>0,032</b>

Т а б л и ц а 3. — Зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  от пути резания  $L$  для концевых фрез из быстрорежущей стали Р6М5 при фрезеровании заготовок из стали 45 на различных режимах резания

Номер опыта	Режимы резания			Зависимости износа по задней поверхности от пути	
	$v$ , м / мин	$s_z$ , мм / зуб	$t$ , мм	Р6М5 неупрочненные	Р6М5 упрочненные
1	15,83	0,0334	1,3	$h_3 = 0,01L^{0,46}$	$h_3 = 0,013L^{0,41}$
2	12,56	0,033	1,3	$h_3 = 0,005L^{0,56}$	$h_3 = 0,006L^{0,51}$
3	15,83	0,0334	2,1	$h_3 = 0,009L^{0,5}$	$h_3 = 0,014L^{0,42}$
4	15,83	0,0334	0,5	$h_3 = 0,014L^{0,42}$	$h_3 = 0,014L^{0,4}$
5	15,83	0,02	1,3	$h_3 = 0,01L^{0,53}$	$h_3 = 0,015L^{0,44}$
6	15,83	0,051	1,3	$h_3 = 0,009L^{0,47}$	$h_3 = 0,009L^{0,44}$
7	20,10	0,033	1,3	$h_3 = 0,027L^{0,36}$	$h_3 = 0,032L^{0,32}$

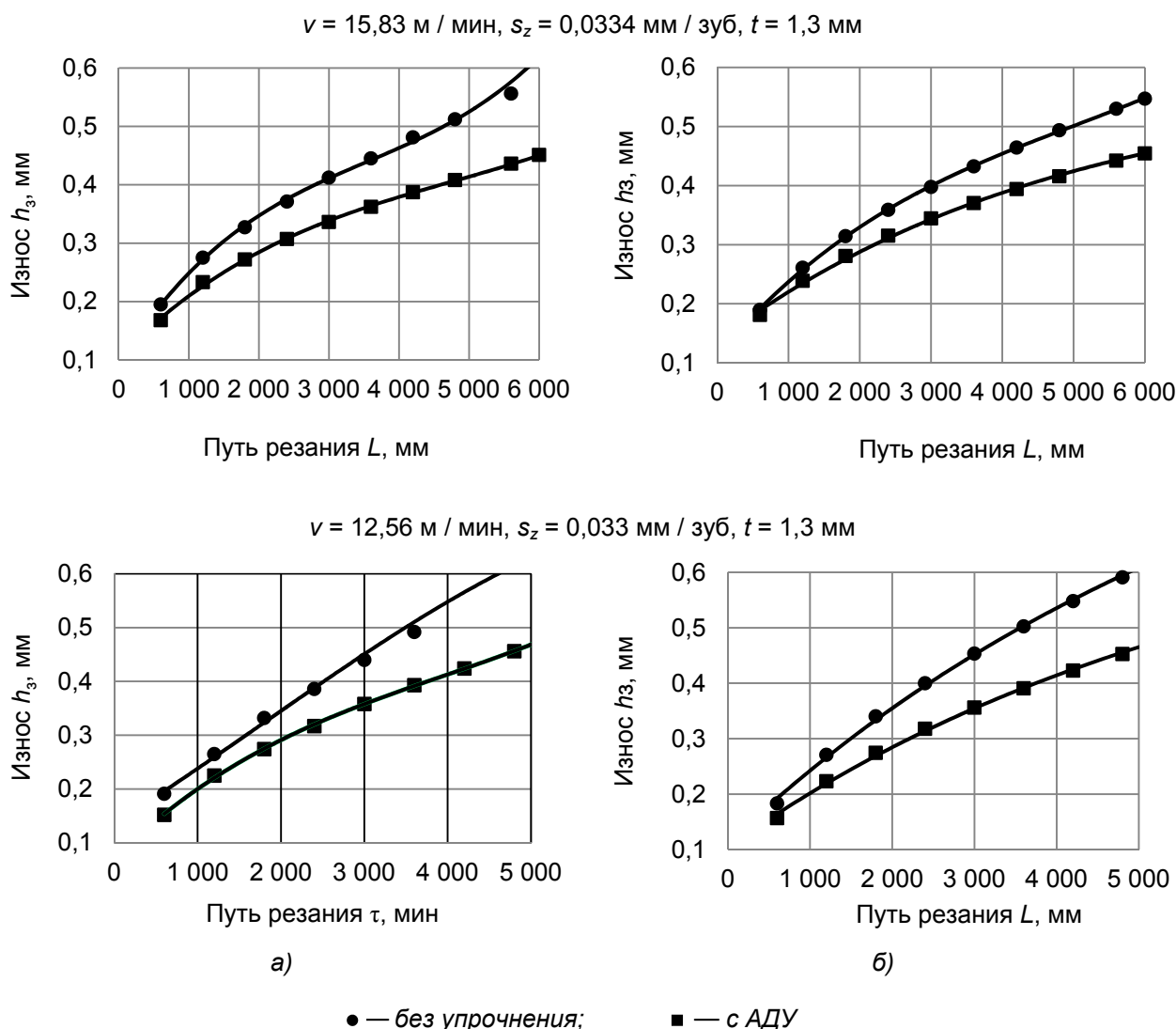
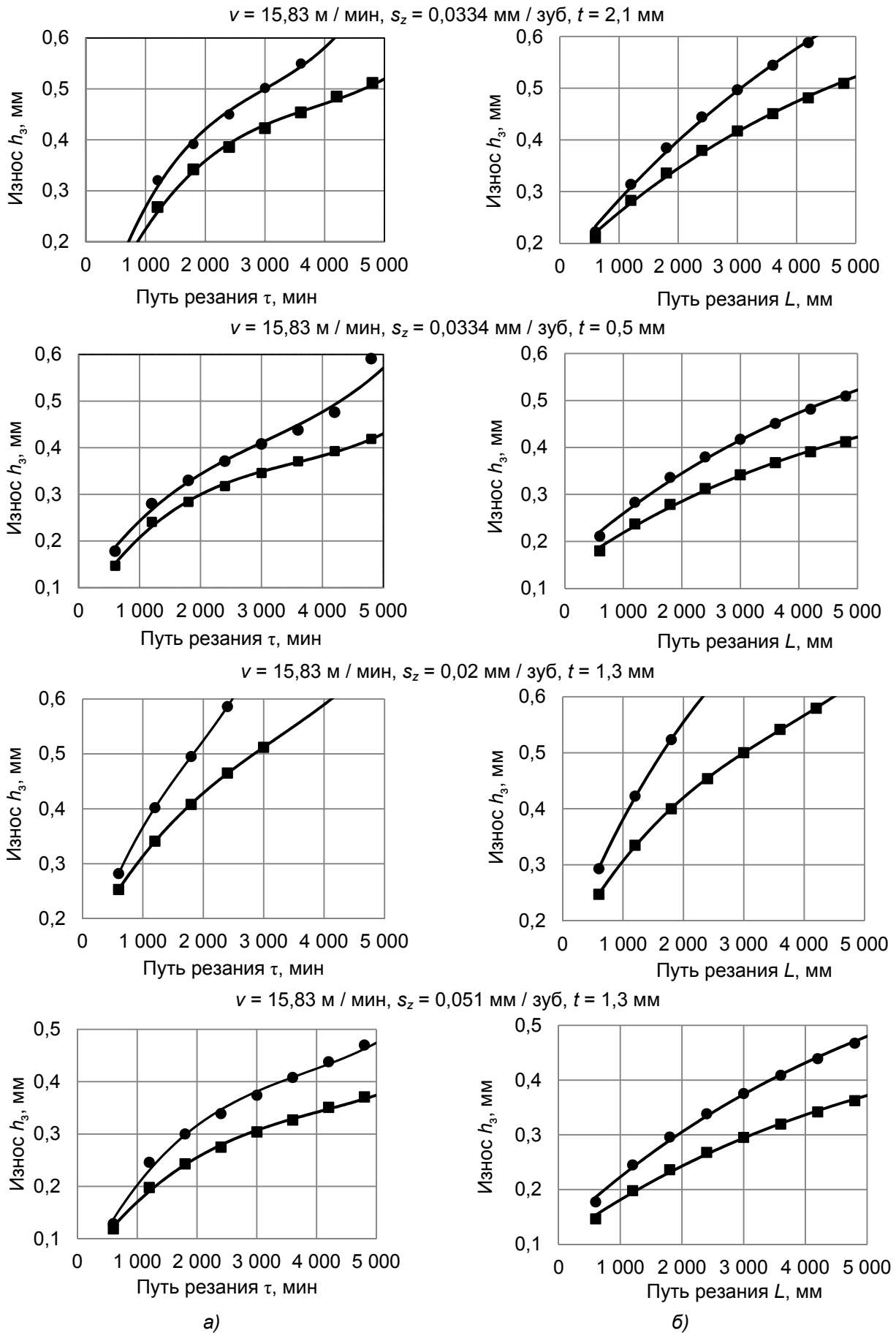
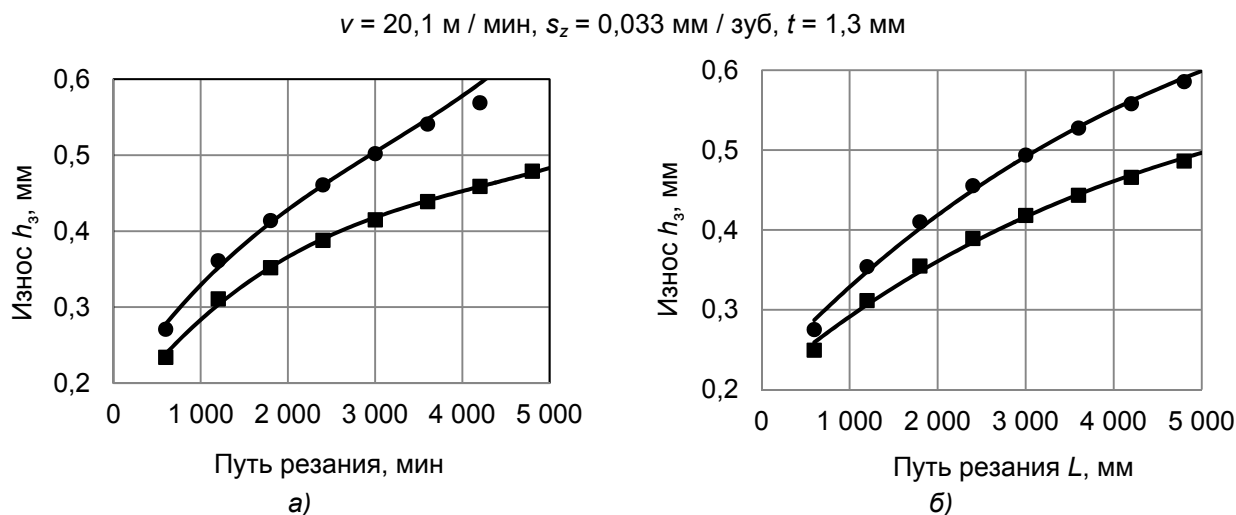


Рисунок 13. — Зависимости износа по задней поверхности  $h_3$ , полученные экспериментально и рассчитанные по формулам, для концевых фрез Р6М5, упрочненных АДУ и неупрочненных, от пути резания при фрезеровании стали 45: а — зависимости экспериментальные; б — зависимости, построенные по формулам



Продолжение рисунка 13



Окончание рисунка 13

Анализ зависимостей, построенных по формулам, и экспериментальных показывает достаточно хорошую их сходимость (погрешность при  $L$  от 0 до 4 000 мм до 8 %). При  $v = 12,56 \dots 20,1 \text{ м / мин}, s_z = 0,02 \dots 0,0334 \text{ мм / зуб}, t = 0,5 \dots 2,1 \text{ мм}$  при фрезеровании заготовок из стали 45 на концевых фрезах из быстрорежущей стали Р6М5 без упрочнения образуется износ по задней поверхности  $h_3 = 0,44 \dots 0,81 \text{ мм}$ , а на фрезах, упрочненных методом АДУ, величина износа по задней поверхности составляет  $h_3 = 0,37 \dots 0,58 \text{ мм}$ . Величина износа снижается на 18...51 %.

**Заключение.** Установлено, что износ по задней поверхности, равный  $h_3 = 0,4 \text{ мм}$  для фрез диаметром 12 мм из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненных аэродинамическим звуковым методом, при фрезеровании образцов из стали 45 наступает при  $\tau = 150 \text{ мин}$ , а для фрез диаметром 12 мм из быстрорежущей стали Р6М5 без упрочнения — при  $\tau = 95 \text{ мин}$ , т. е. стойкость повышается в 1,58 раза. Влияние скорости резания на износ по задней поверхности зуба фрезы из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом, носит экстремальный характер, причем на скорости резания 15,83 м / мин наблюдается минимальная величина износа. При увеличении подачи на зуб износ зуба фрезы из стали Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом, при фрезеровании образцов из стали 45 уменьшается, при этом экстремума износа от подачи на зуб не наблюдается. При глубинах резания до 1,3 мм при увеличении глубины резания происходит снижение износа зуба фрезы, а при глубинах резания свыше 1,3 мм при увеличении глубины резания происходит увеличение износа зуба фрезы, влияние глубины резания на износ носит экстремальный характер.

Полученные эмпирические зависимости износа фрез из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненных методом АДУ и без упрочнения, от пути фрезерования, имеющие достаточно хорошую сходимость (погрешность до 8 %), показывают, что для всех режимов резания в диапазоне: скорость резания — 12,56...20,1 м / мин, подача на зуб — 0,02...0,0334 мм / зуб, глубина фрезерования — 0,5...2,1 мм, при фрезеровании заготовок из стали 45 на концевых фрезах из быстрорежущей стали Р6М5 без упрочнения образуется износ по задней поверхности 0,44...0,81 мм, а на фрезах, упрочненных методом АДУ, величина износа по задней поверхности составляет 0,37...0,58 мм. Полученными зависимостями рекомендовано пользоваться при определении прогнозируемой величины износа при указанных режимах резания для определения технологической стойкости концевых фрез из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненных методом АДУ.



При обработке фрезами из быстрорежущей стали P6M5, упрочненными методом АДУ, явно прослеживается наличие оптимальных режимов резания, при которых присутствует минимальный износ зуба фрезы. Определение таких оптимальных режимов резания позволит дополнительно повысить стойкость фрез из быстрорежущей стали P6M5, упрочненных методом АДУ [9].

Таким образом, осевой фрезерный инструмент из быстрорежущей стали P6M5, упрочненный аэродинамическим звуковым методом, при фрезеровании заготовок из стали 45 обеспечивает относительно неупрочненных фрез из стали P6M5 снижение износа по задней поверхности на 18...51 % на длине фрезерования 4 000 мм при различных режимах резания.

#### Список цитируемых источников

1. *Кожевников, Д. В.* Резание материалов : учеб. для студентов высш. учеб. заведений / Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов ; под общ. ред. С. В. Кирсанова. — М. : Машиностроение, 2007. — 304 с.
2. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 2557175 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков; дата публ.: 20.07.2015.
3. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 21049 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков ; дата публ.: 30.06.2017.
4. *Жигалов, А. Н.* Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. — Могилев : МГУП, 2019. — 213 с.
5. *Горавский, И. А.* Методика проведения аэродинамического звукового упрочнения осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали P6M5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Векторы инновационного развития : материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 11 дек. 2020 г. — Барановичи : БарГУ, 2020. — С. 83—84.
6. *Горавский, И. А.* Методика проведения измерения износа вращающегося режущего инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 23—24 апр. 2020 г. / Белорус.-Рос. ун-т. — Могилев, 2020. — С. 37—38.
7. *Горавский, И. А.* Методика проведения измерения износа вращающегося режущего инструмента по задней поверхности / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Наука—практике : материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 15 мая 2020 г. — Барановичи : БарГУ, 2020. — С. 42—43.
8. *Жигалов, А. Н.* Математическая модель и методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалова // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2019. — Вып. № 7. — С. 49—63.
9. *Жигалов, А. Н.* Оптимизация износа и ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента сплава В354, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский, Д. Д. Богдан // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2020. — Вып. № 8. — С. 21—32.

Поступила в редакцию 09.09.2021.

УДК 658.5.012.14

**В. И. Жигар; В. А. Довгяло**, доктор технических наук, профессор;  
**В. Л. Моисеенко**, кандидат технических наук, доцент

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», ул. Кирова, 34,  
246653 Гомель, Республика Беларусь, +375 (29) 790 71 49, viktor.zhigar@mail.ru

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗВЕНОСБОРОЧНОЙ ЛИНИИ КБ03

В 2012 году на Белорусской железной дороге была введена в эксплуатацию полуавтоматическая звено-сборочная линия КБ03 для сборки рельсошпальной решетки на железобетонных шпалах. Поиск путей повышения производительности ее работы становится все более актуальным, поскольку на Белорусской железной дороге существенно выросли грузоперевозки, увеличились объемы работ по ремонту железнодорожных путей. Для изучения работы звеносборочной линии КБ03 и поиска путей повышения производительности ее работы с помощью системы имитационного моделирования “Tecnomatix Plant Simulation” была построена имитационная модель звеносборочной линии, выполнена валидация модели. На основании анализа результатов проведенных на модели экспериментов были сформированы решения по управлению производственным процессом работы звеносборочной линии КБ03 для получения максимального увеличения ее производительности. Выполнен расчет экономической эффективности внедрения на производстве предлагаемых изменений и корректировок технологического процесса работы звеносборочной линии.

**Ключевые слова:** звеносборочная линия КБ03; имитационная модель; повышение производительности; результаты экспериментов; практическое применение; экономическая эффективность.

Рис. 4. Табл. 7. Библиогр.: 12 назв.

**V. I. Zhihar; V. A. Dovgualo**, Doctor of Technical Sciences, Professor;  
**V. L. Moiseenko**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Belarusian State University of Transport, 34 Kirova Str., 246653 Gomel, the Republic of Belarus,  
+375 (29) 790 71 49, viktor.zhigar@mail.ru

## DETERMINATION OF ECONOMIC EFFICIENCY OF PRACTICAL APPLICATION OF METHODS FOR IMPROVING THE PRODUCTIVITY OF THE LINK ASSEMBLY LINE KB03

In 2012, a semi-automatic link assembly line KB03 was put into operation on the Belarusian Railways to assemble a rail and sleep grid on reinforced concrete sleepers. The search for ways to increase the productivity of its work is becoming more and more urgent, since cargo transportation on the Belarusian Railway has significantly increased, the volume of work on the repair of railway tracks has increased. To study the operation of the assembly line KB03 and search for ways to increase its performance with the use of the Tecnomatix Plant Simulation system, a simulation model of the assembly line was built, and the model was validated. Based on the analysis of the results of the experiments carried out on the model, solutions were formed to control the production process of the KB03 link assembly line to maximize its productivity. The calculation of the economic efficiency of the implementation of the proposed changes and adjustments of the technological process of the link assembly line were performed.

**Key words:** link assembly line KB03; simulation model; productivity increase; experimental results; practical application; economic efficiency.

Fig. 4. Table 7. Ref.: 13 titles.

**Введение.** В 2012 году на производственной базе путевой машинной станции Барановичей в целях увеличения производительности сборки рельсошпальной решетки (далее — РШР) и повышения уровня механизации труда на Белорусской железной дороге была введена в эксплуатацию полуавтоматическая звеносборочная поточная линия КБ03 (рисунок 1), сконструированная на базе звеносборочной линии 1ПЗЛ-100.



Рисунок 1. — Звеносборочная линия КБ03

Линия КБ03 предназначена для сборки звеньев РШР колеи 1 520 мм на рельсах типов Р65/Р50 со скреплением СБ-3 и эпюрой 1 840/2 000 шпал / км. Линия представляет собой систему агрегатов, станков и механизмов, установленных в определенной технологической последовательности и связанных между собой межоперационными транспортирующими устройствами [1].

**Материалы и методы исследования.** Наиболее рациональным инструментом для исследования технологических процессов сборки РШР на звеносборочной линии КБ03 [2; 3] в целях их оптимизации для сокращения затрат и повышения производительности является создание цифровой имитационной модели [4] с помощью программной системы имитационного моделирования “Тесноматix Plant Simulation” [5; 6]. Разработанная по методике [7; 8] имитационная модель звеносборочной линии КБ03 (рисунок 2) дает возможность проведения необходимых исследований реального объекта на компьютере, без вмешательства в существующий производственный процесс, а также осуществления сбора необходимых статистических данных в процессе моделирования всей моделируемой системы и ее отдельных объектов.

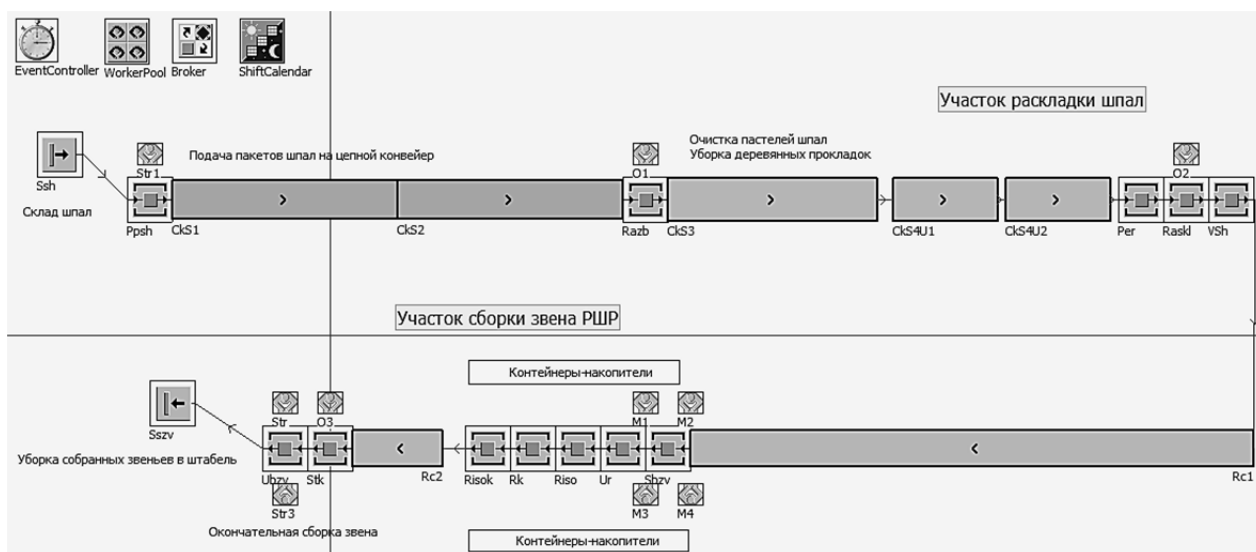


Рисунок 2. — Общий вид имитационной модели звеносборочной линии KB03

**Результаты исследования и их обсуждение.** После построения имитационной модели выполнена ее валидация [9]. В соответствии с [10] построенная имитационная модель соответствует всем необходимым требованиям: непротиворечивость, чувствительность, точность, реалистичность, работоспособность. Погрешность результатов имитации относительно фактических данных составляет 1,75 %. На имитационной модели проведены эксперименты по определению производительности работы звеносборочной линии при фактических условиях, использовании на ней работников четвертого квалификационного разряда, использовании на ней работников пятого квалификационного разряда, использовании двух дополнительных работников, повышении надежности технических средств до 95 %, оптимальных условиях (на линии используются работники (монтеры пути, стропальщики) пятого квалификационного разряда, к работам привлечены два дополнительных работника (монтеры пути третьего квалификационного разряда), надежность технических средств составляет 95 %). Значения производительности звеносборочной линии согласно проведенным экспериментам представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1. — Производительность звеносборочной линии

Наименование эксперимента	Производительность		Отношение к производительности при фактических условиях	
	звеньев	км	км	%
При фактических условиях	3 069	76,725	—	—
При использовании работников четвертого квалификационного разряда	3 121	78,025	+1,300	+1,690
При использовании работников пятого квалификационного разряда	3 160	79,00	+2,275	+2,970
При надежности технических средств 95 %	3 069	76,725	—	—
При использовании двух дополнительных работников (монтеров пути из числа работников предприятия)	3 169	79,225	+2,500	+3,260
При оптимальных условиях	3 242	81,050	+4,325	+5,640

Для определения экономической эффективности результатов экспериментов необходимо рассчитать универсальный показатель работы участка сборки путевой решетки — стоимость одного километра собранной РШР на звеносборочной линии, определяемую по формуле

$$C = \Pi / \Sigma Z, \quad (1)$$

где  $\Pi$  — производительность звеносборочной линии за рассматриваемый период (2 008 ч), км;  
 $\Sigma Z$  — суммарные затраты предприятия на сборку РШР за рассматриваемый период (2 008 ч), р.

Основными статьями расходов предприятия при сборке РШР на звеносборочной линии являются: 1) электроэнергия, расходуемая при работе звеносборочной линии; 2) амортизационные отчисления; 3) заработная плата работникам, занятым на звеносборочной линии; 4) материалы, необходимые для сборки РШР.

Расход электроэнергии при работе звеносборочной линии постоянный и не зависит от ее производительности. Расходы предприятия на электроэнергию, потребляемую звеносборочной линией за рассматриваемый период, составляют:

$$150 \cdot 2\,008 \cdot 0,263 = 79\,215,60 \text{ р.},$$

где 150 — номинальная установленная мощность звеносборочной линии согласно [1];  
 2 008 — количество рабочих часов в 2019 году согласно [11];  
 0,263 — средняя цена за 1 кВт электроэнергии для промышленных предприятий за 2019 год.

Амортизационные отчисления предприятия на звеносборочную линию за 2019 год составили 386 578,17 р. Данные расходы не зависят от производительности звеносборочной линии.

Расчет заработной платы работников выполнен в соответствии с [12] на основе статистических данных по заработной плате на предприятии за 2019 год. Период расчета — 2 008 ч. Исходные данные для расчета заработной платы работников, занятых на звеносборочной линии, представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2. — Исходные данные для расчета заработной платы работников

Вид оплаты	Монтер пути			Машинист крана	Оператор
	третьего разряда	четвертого разряда	пятого разряда		
Средний процент выработки, %	131,6	131,6	131,6	—	—
Часовая ставка	2,8956	3,1070	3,3183	4,0422	3,824
Часовая ставка с учетом процента выработки	3,8106	4,0888	4,3669	—	—
Доплата рабочим со сдельной оплатой труда за работу с вредными и (или) опасными условиями труда за каждый час работы во вредных условиях, р.	0,17	0,17	0,17	—	—
Средняя премия рабочим с повременной/сдельно-премиальной оплатой труда, %	27,50	22,29	24,44	9,24	12,83
Часовая ставка без повышающего коэффициента	—	—	—	2,8716	3,1109
Средний процент надбавки квалифицированным рабочим за профессиональное мастерство, %	17	21	25	16	10
Средний процент надбавки к заработной плате за стаж работы, %	15,71	25,45	28,33	23,75	20,00

Заработная плата работников, занятых на звеносборочной линии, представлена в таблице 3. Общие затраты предприятия на заработную плату работникам, занятым на звеносборочной линии, согласно проведенным экспериментам, представлены в таблице 4.

Информация о количестве материалов верхнего строения пути (далее — МВСП), необходимых для сборки РШР на звеносборочной линии, согласно проведенным экспериментам, представлена в таблице 5.

Т а б л и ц а 3. — Заработная плата работников, р.

Показатель	Монтер пути			Машинист крана пятого разряда	Оператор пятого разряда
	третьего разряда	четвертого разряда	пятого разряда		
Оплата по сдельным расценкам / тарифным ставкам	7 651,68	8 210,31	8 768,74	8 116,74	7 678,59
Премия рабочим с повременной/сдельно-премиальной оплатой труда	2 198,09	1 906,17	2 226,51	749,99	985,16
Надбавка квалифицированным рабочим за профессиональное мастерство	988,44	1 310,16	1 665,79	922,59	624,67
Надбавка к заработной плате за стаж работы	913,44	1 587,79	1 887,67	1 927,73	1 535,72
Доплата рабочим со сдельной оплатой труда за работу с вредными и (или) опасными условиями труда	341,36	341,36	341,36	—	—
ВСЕГО	12 093,01	13 355,79	14 890,07	11 717,05	10 824,14

Т а б л и ц а 4. — Общие затраты на заработную плату, р.

Наименование эксперимента	Затраты на заработную плату
При фактических условиях	175 708,70
При использовании работников четвертого квалификационного разряда	184 548,20
При использовании работников пятого квалификационного разряда	195 288,20
При надежности технических средств 95 %	175 708,70
При использовании двух дополнительных работников	199 894,80
При оптимальных условиях	219 474,22

Т а б л и ц а 5. — Количество необходимых МВСП для сборки РШР

Наименование эксперимента	Шпала, шт.	Пружинная клемма, шт.	Изолятор, шт.	Изолирующая прокладка, шт.	Рельс Р65, КПУ
При фактических условиях	141 174	564 696	564 696	282 348	76,725
При использовании работников четвертого квалификационного разряда	143 566	574 264	574 264	287 132	78,025

Окончание таблицы 5

Наименование эксперимента	Шпала, шт.	Пружинная клемма, шт.	Изолятор, шт.	Изолирующая прокладка, шт.	Рельс Р65, КПУ
При использовании работников пятого квалификационного разряда	145 360	581 440	581 440	290 720	79
При надежности технических средств 95 %	141 174	564 696	564 696	282 348	76,725
При использовании двух дополнительных работников	145 774	583 096	583 096	291 548	79,225
При оптимальных условиях	149 132	596 528	596 528	298 264	81,05

Стоимость МВСП, установленная в соответствии с актом стоимости материалов верхнего строения пути, представлена в таблице 6.

Общие затраты предприятия на МВСП, необходимые для сборки РШР на звеносборочной линии, согласно проведенным экспериментам, представлены в таблице 7.

На рисунке 3 представлен график, отображающий затраты предприятия по основным статьям расходов при сборке РШР на звеносборочной линии согласно проведенным экспериментам.

Т а б л и ц а 6. — Стоимость МВСП

МВСП	Единица измерения	Стоимость за единицу, р.
Шпала	шт.	96,93
Пружинная клемма	шт.	2,93
Изолятор	шт.	0,46
Изолирующая прокладка	шт.	2,45
Рельс Р65	КПУ	7 839,14

Т а б л и ц а 7. — Общие затраты предприятия на МВСП

Наименование эксперимента	Затраты на МВСП, р.
При фактических условиях	40 348 388,52
При использовании работников четвертого квалификационного разряда	41 032 036,68
При использовании работников пятого квалификационного разряда	41 544 772,80
При надежности технических средств 95 %	40 348 388,52
При использовании двух дополнительных работников	41 663 096,52
При оптимальных условиях	42 622 833,36

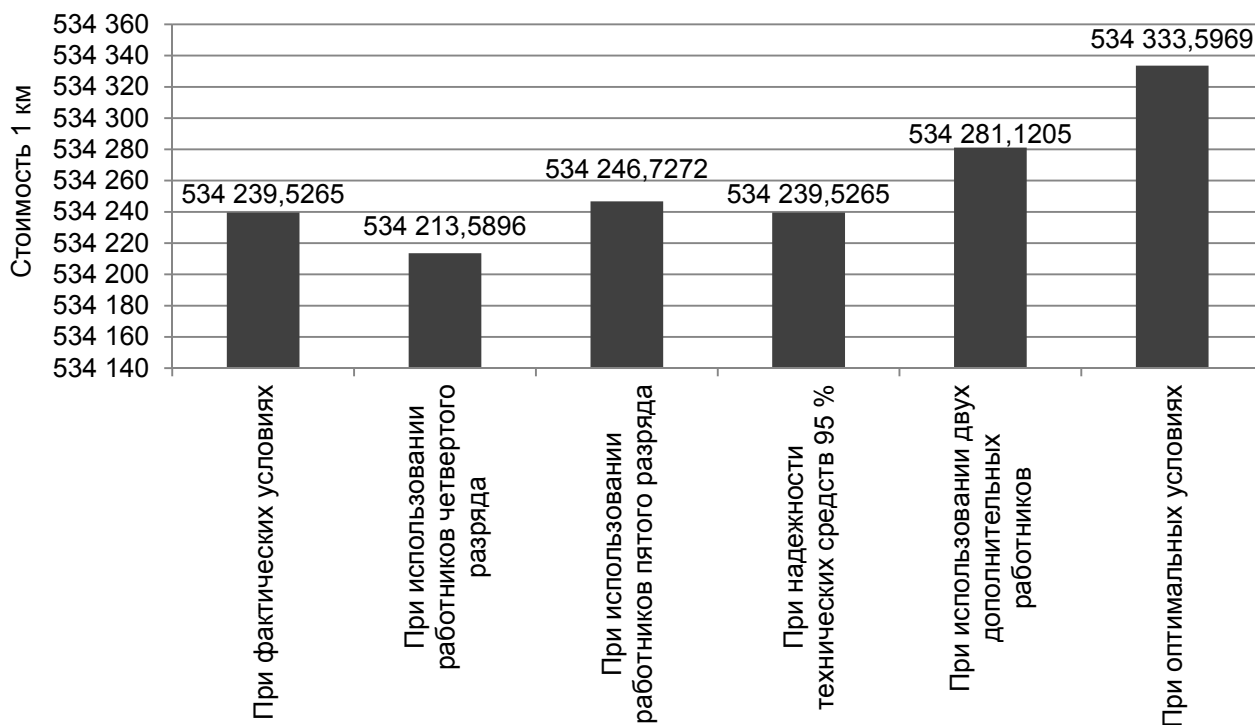


Рисунок 3. — Общие затраты предприятия

По формуле (1) определена стоимость одного километра собранной РШР для каждого проведенного эксперимента. Результаты расчетов представлены на рисунке 4.

При использовании на линии работников (монтеров пути, стропальщиков) четвертого квалификационного разряда производительность звеносборочной линии относительно фактической увеличивается на 1,69 %, при этом затраты предприятия на один километр собираемой РШР уменьшаются на 0,0049 % (минус 25,94 р. в стоимостном выражении).

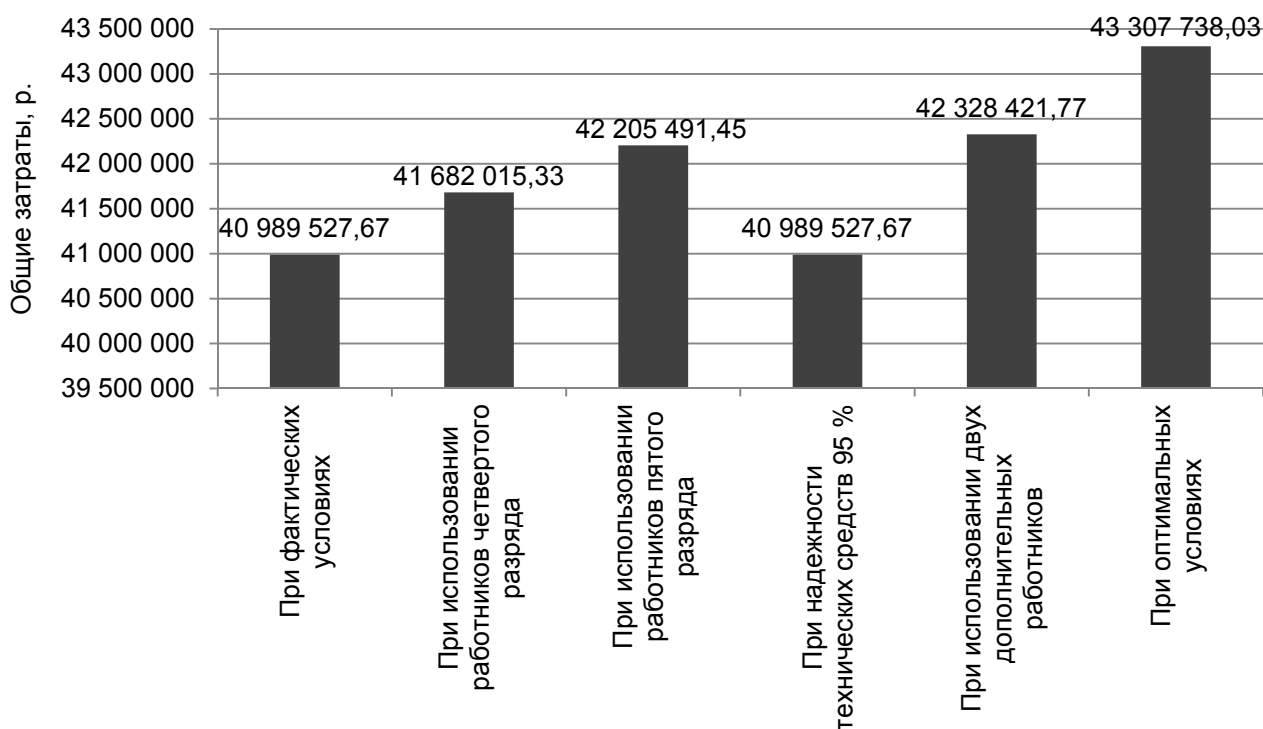


Рисунок 4. — Стоимость одного километра РШР



При использовании на линии работников (монтеров пути, стропальщиков) пятого квалификационного разряда производительность звеносборочной линии относительно фактической увеличивается на 2,97 %, при этом затраты предприятия на один километр собираемой РШР увеличиваются на 0,0013 % (плюс 7,20 р. в стоимостном выражении).

При надежности технических средств 95 % производительность звеносборочной линии относительно фактической не изменяется, затраты предприятия на один километр собираемой РШР также не изменяются.

При использовании на линии двух дополнительных работников (монтеров пути третьего квалификационного разряда) производительность звеносборочной линии относительно фактической увеличивается на 3,26 %, при этом затраты предприятия на один километр собираемой РШР увеличиваются на 0,0078 % (плюс 41,59 р. в стоимостном выражении).

При оптимальных условиях (монтеры пути, стропальщики пятого квалификационного разряда, два дополнительных монтера пути третьего квалификационного разряда, надежность технических средств 95 %) производительность звеносборочной линии относительно фактической увеличивается на 5,64 %, при этом затраты предприятия на один километр собираемой РШР увеличиваются на 0,0176 % (плюс 94,07 р. в стоимостном выражении).

**Заключение.** Увеличение затрат предприятия при внесении изменений в технологический процесс сборки РШР на звеносборочной линии на один километр собираемой РШР относительно фактических значительно меньше 1 %. Таким образом, согласно результатам проведенных экспериментов, увеличение производительности сборки РШР на звеносборочной линии существенно перекрывает рост затрат предприятия на один километр собираемой РШР, что говорит об экономической эффективности предлагаемых изменений технологического процесса сборки РШР на звеносборочной линии.

#### Список цитируемых источников

1. Открытое акционерное общество «Барановичский завод автоматических линий». Технологический комплекс для сборки звеньев железнодорожного пути с железобетонными шпалами : рук. по эксплуатации. КБ03-00.000 РЭ. — Барановичи, 2011.
2. Имитационное моделирование организации производственных процессов машиностроительных предприятий в инструментальной среде “Tescnomatix Plant Simulation” : лаборатор. практикум / И. Г. Абрамова [и др.]. — Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2014. — 80 с.
3. Агапов, А. С. Имитационное моделирование : учеб. и практикум для академ. бакалавриата / А. С. Агапов. — М. : Юрайт, 2014. — 389 с.
4. Журавлев, С. С. Краткий обзор методов и средств имитационного моделирования производственных систем [Электронный ресурс] / С. С. Журавлев // Имитационное моделирование технических систем и технологических процессов / Конструктор.-технолог. ин-т вычисл. техники СО РАН, Новосибирск. — 2010. — Режим доступа: [simulation.su/uploads/files/default/obzor-2010](http://simulation.su/uploads/files/default/obzor-2010) . — Дата доступа: 03.08.2019.
5. Официальный сайт Siemens [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [Plant Simulation—http://www.plm.automation.siemens.com/ru](http://www.plm.automation.siemens.com/ru) . — Дата доступа: 03.08.2019.
6. Сырецкий, Г. А. Стратегии и методы Plant Simulation как современная основа обучения имитационному моделированию / Г. А. Сырецкий // Имитационное моделирование. Теория и практика : сб. докл. IV Всерос. науч.-практ. конф. ИММОД-2009, Санкт-Петербург, 2009 г. / ОАО «ЦТСС». — СПб., 2009. — Т. 2. — С. 254—257.
7. Law, A. M. How to build valid and credible simulation models / A. M. Law // Proc. of the Winter Simulation Conf. — Miami (USA), 7—10 Dec. 2008. — P. 39—47.
8. Конюх, В. Л. Методы имитационного моделирования систем. Применение программных продуктов / В. Л. Конюх, Я. Б. Игнатъев, В. В. Зиновьев ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Кемер. науч. центр. — Кемерово : КемНЦ, 2003.
9. Яцкив, И. В. Проблема валидации имитационной модели и ее возможные решения / И. В. Яцкив // Теория имитационного моделирования: ИММОД-2003 : I Всерос. науч.-практ. конф. по вопросам применения ими-

тацион. моделирования в промышленности ; ФГУП ЦНИИ технологии судостроения, Санкт-Петербург, 23—24 окт. 2003 г. — СПб., 2003. — Т. 1. — С. 211—217.

10. *Сморodinский, С. С.* Оптимизация решений на основе методов и моделей математического программирования : учеб. пособие / С. С. Смородинский, Н. В. Батин. — Минск : БГУИР, 2003. — 136 с.

11. Об установлении расчетной нормы рабочего времени на 2019 год [Электронный ресурс] : постановление М-ва труда и соц. защиты Респ. Беларусь от 22 окт. 2018 г. № 77. — Режим доступа: [https://kodeksy-by.com/norm\\_akt/source-МинтрудаРБ/type-Постановление/77-22.10.2018.htm](https://kodeksy-by.com/norm_akt/source-МинтрудаРБ/type-Постановление/77-22.10.2018.htm) . — Дата доступа: 20.01.2020.

12. Номенклатура наименований и кодов видов оплаты труда и удержаний из заработной платы работников государственно объединения «Белорусская железная дорога», обособленных структурных подразделений и организаций, входящих в ее состав, утвержденная приказом Начальника Белорусской железной дороги от 20.12.2018 № 351Н [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.rw.by/corporate/normative\\_documents/](https://www.rw.by/corporate/normative_documents/) . — Дата доступа: 20.01.2021.

Поступила в редакцию 25.05.2021.

УДК 62-757.73

**И. В. Качанов**<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор;**А. В. Филипчик**<sup>2</sup>, кандидат технических наук;**И. М. Шаталов**<sup>1</sup>; **Д. М. Бульга**<sup>2</sup>; **В. С. Ковалевич**<sup>1</sup>; **С. В. Недвецкий**<sup>2</sup>; **В. А. Денисов**<sup>1</sup><sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65,

220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 293 96 13

<sup>2</sup>Филиал «Институт переподготовки и повышения квалификации» государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», 202135 д. Светлая Роцца, 1, Борисовский район, Минская область, Республика Беларусь, +375 (17) 777 27 74

## ГИДРОАБРАЗИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ ОТ КОРРОЗИИ

В статье анализируются современные технологии для очистки металлических поверхностей от коррозии, даны их преимущества и недостатки. Приведены результаты исследований, проведенных авторами, по очистке металлической поверхности гребного винта от коррозии с использованием технологии струйной гидроабразивной обработки с применением бентонитовой глины. Установлено наличие защитного пленочного покрытия, сформированного в процессе струйной гидроабразивной обработки.

**Ключевые слова:** технология; гидроабразив; струя; очистка; металл; коррозия; бентонитовая глина.

Рис. 8. Библиогр.: 12 назв.

**I. V. Kachanov**<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor;**A. V. Filipchik**<sup>2</sup>, PhD in Technical Sciences;**I. M. Shatalov**<sup>1</sup>; **D. M. Bulyga**<sup>2</sup>; **V. S. Kovalevich**<sup>1</sup>; **S. V. Nedvetsky**<sup>2</sup>; **V. A. Denisov**<sup>1</sup><sup>1</sup>Belarusian National Technical University, 65 Independence Ave.,

220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 293 96 13

<sup>2</sup>Branch “Institute for Retraining and Advanced Studies” of the State Educational Institution

“University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus”, 202135 Svetlaya Roscha, 1, Borisovsky dist., Minsk reg., the Republic of Belarus, +375 (17) 777 27 74

## HYDRO-ABRASIVE TECHNOLOGY FOR CLEANING METAL SURFACES OF PROPELLERS FROM CORROSION

The article analyzes modern technologies for cleaning metal surfaces from corrosion, their advantages and disadvantages are given. The results of the research conducted by the authors on cleaning the metal surface of the propeller from corrosion using the technology of water jet treatment using bentonite clay are presented. The presence of a protective film coating formed during the processing the jet HAC has been established.

**Key words:** technology; hydro-abrasive; jet; cleaning; metal; corrosion; bentonite clay.

Fig. 8. Ref.: 12 titles.

**Введение.** При эксплуатации машин и механизмов отмечается значительный рост потерь от коррозионных разрушений, что требует резкого улучшения мер противокоррозионной защиты. Исследования, приведенные рядом авторов, показывают, что весьма эффективно для борьбы с коррозией может быть использована технология гидроабразивной очистки (далее — ГАО), обеспечивающая наряду с очисткой формирование защитного пленочного покрытия с достаточно высокой адгезионной прочностью [1—4].

Практически каждый технологический процесс в современном машиностроительном производстве включает операцию очистки деталей от коррозии, различных загрязнений. Ме-

няющиеся требования к этим процессам неразрывно связаны с модернизацией оборудования для очистки металлических поверхностей. Некоторые новые образцы представляются на международных промышленных выставках по очистке. Например, в 2019 году на выставке в Штутгарте (Германия) фирма Mafac представила моечную установку Java с векторным движением деталей; фирма BVL — установку Libelle Product для точного позиционирования очищаемых деталей; фирма Wigol — специальное средство Booster TE для удаления ржавчины и окалины [5].

*Аналитический обзор существующих методов очистки металлических поверхностей от коррозии.* В настоящее время за рубежом и в Республике Беларусь для очистки металлических поверхностей от коррозии используются технологии, представленные на рисунке 1.

Выбор того или иного способа очистки зависит от объема выполняемых работ, типа коррозии, размеров очищаемых изделий.

Механический способ предусматривает очистку ручным и механизированным инструментом. При выполнении объема работ, связанного с очисткой металлической поверхности от коррозии, в качестве ручного инструмента могут использоваться скребки, металлические щетки, шарошки и т. п. [1; 3].

В целях повышения производительности очистки механическим способом используется механизированный инструмент — пневматические и электрические зачистные машины. Рабочими органами таких машин являются металлические щетки, иглофрезы, шлифовальные круги и т. п. Для одновременной очистки от коррозии и старых лакокрасочных покрытий используют иглофрезы или щётки различных модификаций [3].

Производительность процесса очистки металлических поверхностей от коррозии с помощью механизированного инструмента составляет  $2 \div 10 \text{ м}^2 / \text{ч}$ , а энергоёмкость —  $0,5 \text{ кВт ч} / \text{м}^2$  [3; 6].

Наряду с достоинствами указанный способ очистки имеет ряд недостатков [3; 6]:

- применение ручного труда;
- образование замкнутой кинематической системы инструмента с обрабатываемой поверхностью;
- влияние тепловыделения и вибрации на качество обрабатываемой поверхности, которое ухудшается в связи с проявлением таких дефектов на поверхности изделия, как прижоги, трещины, следы вибрации (огранка).

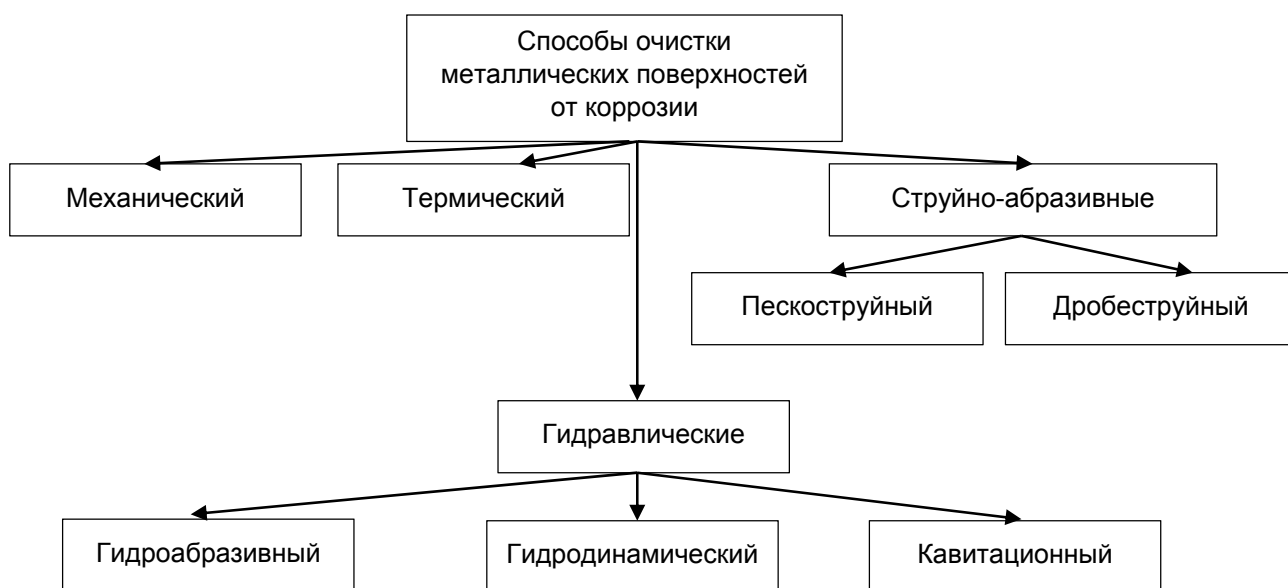


Рисунок 1. — Схема применяемых способов для очистки металлических поверхностей от коррозии [1; 3]

Необходимо отметить, что при очистке металлических поверхностей от коррозии механизированным инструментом на поверхности очищаемого изделия остается до 250 г продуктов коррозии на  $1 \text{ м}^2$  [1; 3; 6].

Термические способы очистки поверхностей от коррозии основаны на нагреве пламенем до температуры их сгорания.

Для исключения коробления и температурной деформации данная технология применяется для металлов с толщиной не менее 6 мм. Производительность очистки составляет  $1 \div 1,5 \text{ м}^2 / \text{ч}$  [1; 3].

Следует отметить, что ряд существенных недостатков (невозможность удаления продуктов коррозии с тонколистовой стали; необходимость дополнительной очистки металлической поверхности от окалины, а воздуха — от вредных продуктов сгорания) ограничивает применение термических способов [1; 3]. Сложность применяемого оборудования и высокие требования по технике безопасности, экологии ограничивают использование этих способов на машиностроительных предприятиях.

Струйно-абразивные способы очистки находят широкое применение при очистке поверхностей от коррозии, нагара, окалины, старых лакокрасочных покрытий. В качестве абразива используется кварцевый песок, корунд, карбид кремния, стальная или чугунная дробь, стеклянная дробь, косточковая крошка, сухой лёд и другие материалы [1; 3].

На международной выставке Parts2clean 2019 (Германия) было представлено различное оборудование для сухой очистки обработанных деталей с использованием струи замороженного  $\text{CO}_2$ . Фирма ACP Systems предложила оборудование Quattro Clean System для очистки перед нанесением лака на детали из синтетических материалов. Очистку деталей осуществляют струей замороженной двуокиси углерода с температурой  $78,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , подаваемой в рабочую зону через струеформирующее устройство [7].

Как показывает мировой промышленный опыт, из различных струйно-абразивных способов достаточно широкое распространение получили пескоструйная и дробеструйная очистка металлических поверхностей от коррозии.

Гидроабразивная очистка предусматривает использование в струйном потоке жидкости таких абразивных материалов как стекло, пемза, кварц, гранит, тальк, известняк, глина [1; 3].

При ГАО на поверхности обрабатываемой детали образуется жидкостная пленка, заполняющая неровности поверхности; абразивные частицы при ударе по выступающим неровностям не преодолевают сопротивления этой пленки и поэтому воздействуют только на выступы; частицы же, которые ударяют по впадинам, должны преодолеть сопротивление жидкостной пленки, поэтому эффективность их воздействия невелика. Вследствие этого происходит постепенное уменьшение шероховатости обрабатываемой поверхности до  $Ra = 0,05 \div 1 \text{ мкм}$ . Производительность ГАО составляет  $5 \div 6 \text{ м}^2 / \text{ч}$  [1; 3].

К числу достоинств гидроабразивного способа можно отнести:

- отсутствие пылевыведения в зоне очистки;
- устранение проблемы разупрочнения поверхности за счет теплоотвода повышенной температуры в зоне обработки посредством воды;
- отсутствие зависимости от исходной шероховатости обрабатываемого материала;
- повышенный срок использования абразива (в 2-3 раза выше, чем при пескоструйной обработке) за счет демпфирующего действия рабочей жидкости.

Оборудование для реализации технологии ГАО предлагается фирмой WardJet LLC и представляет установку (X-1530) для быстрой и точной ГАО с соответствующим программным обеспечением для автоматизации операций загрузки/выгрузки и очередности обработки деталей. Установка оснащается специальным насосом, подающим гидроабразивную струю под давлением 420 МПа, что позволяет эффективно и точно обрабатывать стекло, сталь, пластики и различные сплавы [8].

Гидродинамический способ очистки предусматривает использование струй воды низкого (до 1 МПа), среднего ( $1 \div 5 \text{ МПа}$ ) и высокого давления ( $5 \div 60 \text{ МПа}$ ) [1; 3].

Основным препятствием на пути применения высоконапорных гидродинамических установок является их высокая стоимость и значительные энергозатраты. Для создания высокого давления приходится использовать дорогое и громоздкое энергоемкое оборудование.

Кавитационный способ очистки основан на использовании эффекта схлопывания кавитационных парогазовых микропузырьков. При схлопывании кавитационного микропузырька в локальном объеме вблизи и внутри него возникают поля высоких давлений (до 1 000 МПа) и температур (1 000÷2 000 °С). При коллапсе пузырька в жидкости генерируются волны разрежения/сжатия, способные на обработанной поверхности сформировать кумулятивные микроструи со скоростями движения в 100÷520 м / с [1; 3].

Очистка от коррозии кавитационными струями является эффективным способом обработки поверхностей, а присутствие кавитационных пузырьков усиливает эрозионное воздействие [1; 3].

Существенными недостатками рассмотренных гидравлических способов очистки являются: быстрая повторная коррозия очищенных влажных поверхностей; необходимость обязательного пассивирования поверхности; повышенный износ струеформирующих устройств.

Анализ вышеуказанных современных технологий позволил разработать на кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ новый отечественный способ борьбы с коррозией с применением бентонитовой глины, кальцинированной соды, полиакриламида, обеспечивающий наряду с очисткой формирование защитного пленочного покрытия с высокой адгезионной прочностью. Следует отметить, что разработанная технология ГАО обладает патентной новизной [9—12].

**Материалы и методы исследования.** Для экспериментального исследования, а также для оценки практической применимости новой технологии ГАО в качестве образца был выбран гребной винт (марка материала — ВСт3сп4), применяемый в роли движителя на буксире-толкаче проекта 861У.

Гребной винт до обработки (рисунок 2, а), имевший серьезный износ от биологической и химической коррозии основного металла, не мог обладать проектными качествами, что приводило к потере ходкости судна, а следовательно, снижению КПД пропульсивного комплекса и повышенному расходу топлива.

В ходе экспериментальных исследований в лабораторных условиях гребной винт был обработан с помощью новой технологии — струйной ГАО (рисунок 2, б). После обработки было обнаружено и зафиксировано на поверхности гребного винта пленочное покрытие (рисунок 3), которое далее было исследовано на морфологию и химический состав.



а)



б)

**Рисунок 2. — Внешний вид лопастей гребного винта:  
а — поверхность до обработки; б — обработанная поверхность**

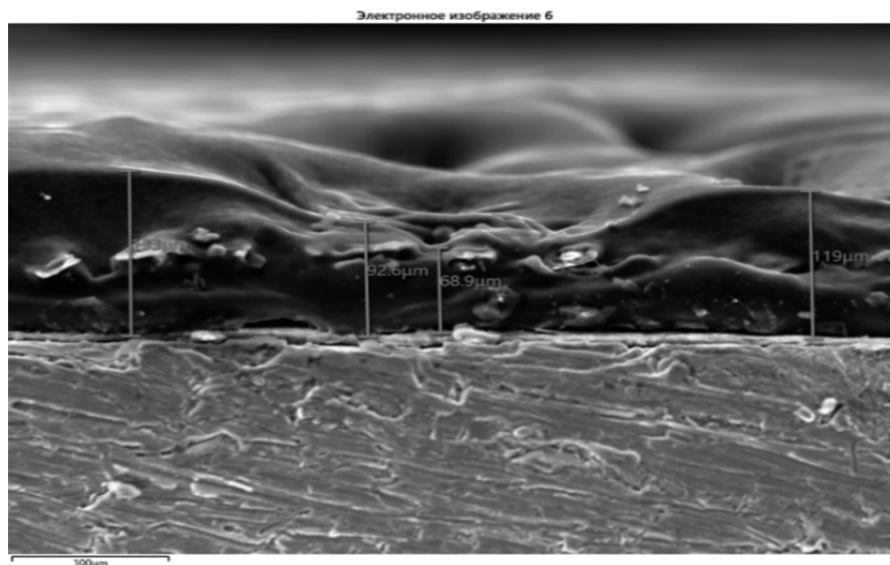
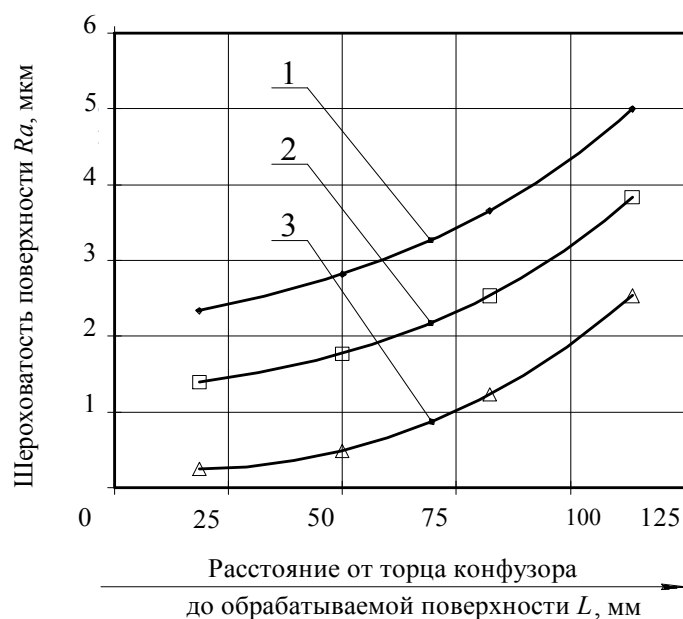


Рисунок 3. — Пленочное покрытие, образованное после обработки струйной ГАО на поверхности гребного винта

Для установления химического состава пленочного покрытия на поверхности гребного винта в нескольких точках производился рентгеновский энергодисперсионный спектрометрический анализ с учетом Fe и без учета Fe. Анализ полученных данных позволил установить, что в состав пленочного покрытия входят те же элементы, которые составляют химическую основу компонентов рабочей жидкости (бентонитовая глина, кальцинированная сода, полиакриламид).

Одними из важных морфологических характеристик, влияющих на пропульсивные качества гребного винта, являются шероховатость и микротвердость засасывающей и нагнетательной поверхностей. На рисунке 4 представлено влияние расстояния  $L$  от конфузора до обрабатываемой поверхности на шероховатость поверхности  $Ra$  при изменении давления на входе в конфузор  $p_{вх}$  от 17 до 30 МПа.



1 —  $p_{вх} = 17$  МПа; 2 —  $p_{вх} = 22$  МПа; 3 —  $p_{вх} = 30$  МПа;  
 $K_б = 3\%$ ;  $K_п = 10^{-5}\%$ ;  $K_{к.с} = 2\%$ ; остальное — вода;  
 материал — ВСтЗсп4

Рисунок 4. — Зависимость шероховатости  $Ra$  от расстояния  $L$

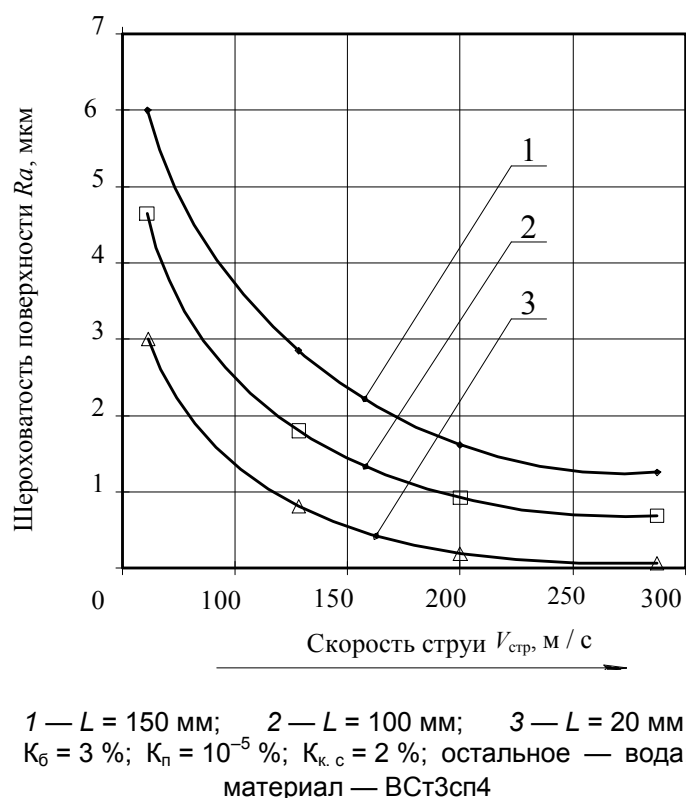
Исследования морфологических характеристик гребного винта проводились в испытательном центре государственного научного учреждения «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа» (Минск). При проведении испытаний шероховатость определялась на профилометре-профилографе модели 252 типа А1. Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере Micromet-2. Адгезионная прочность измерялась методом склерометрии.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Как следует из рисунка 4, шероховатость обработанной поверхности  $Ra$  увеличивается от 0,2 до 5,5 мкм при изменении  $L$  от 20 до 110 мм. Увеличение  $Ra$  объясняется тем, что силовое воздействие уменьшается по мере удаления обрабатываемой поверхности от выходного сечения конфузора за счет раскрытия факела струи.

На рисунке 4 видно, что при давлении на входе в конфузор  $p_{вх} = 30$  МПа и расстоянии  $L$  от 15 до 50 мм значения шероховатости  $Ra = 0,2 \div 0,4$  мкм, что согласно ГОСТ 8054-81 является оптимальным показателем для поверхности гребного винта.

На рисунке 5 представлена зависимость изменения шероховатости поверхности  $Ra$  от скорости струи рабочей жидкости  $V_{стр}$ .

Из анализа кривых на рисунке 5 следует, что шероховатость обработанной поверхности  $Ra$  уменьшается от 6 до 0,2 мкм при увеличении  $V_{стр}$  от 15 до 280 м / с. Уменьшение  $Ra$  объясняется тем, что с увеличением скорости струи рабочей жидкости  $V_{стр}$  происходит увеличение силового воздействия струи рабочей жидкости на обрабатываемую поверхность. При изменении скорости струи от 200 до 250 м / с ( $L = 20$  мм) шероховатость изменяется в диапазоне  $Ra = 0,2 \div 0,4$  мкм, что, согласно ГОСТ 8054-81, является оптимальным показателем для поверхности гребного винта.



**Рисунок 5.** – Зависимость шероховатости  $Ra$  от скорости струи  $V_{стр}$



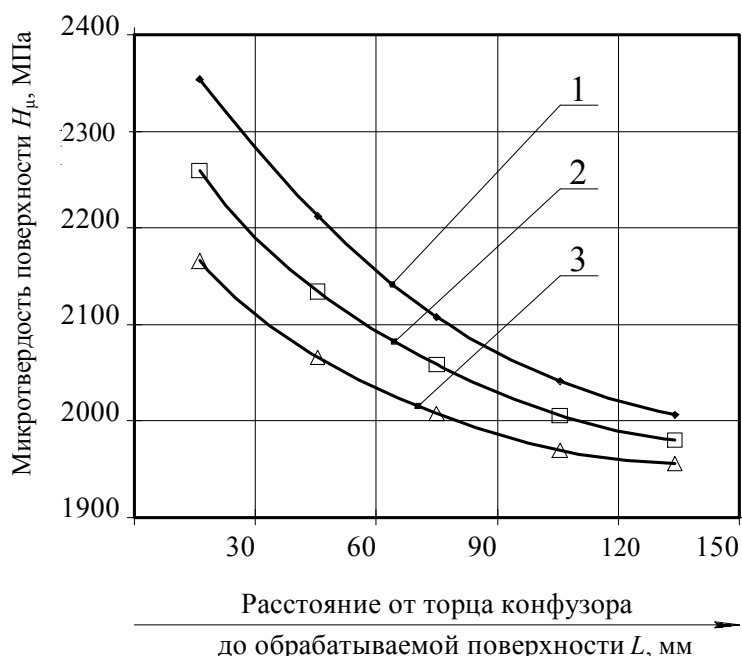
Наряду с исследованиями влияния гидроабразивной очистки на шероховатость также изучалось влияние струйной обработки на микротвердость  $H_{\mu}$  (МПа) поверхности. На рисунке 6 представлена зависимость влияния расстояния  $L$  от конфузора до обрабатываемой поверхности на микротвердость поверхности  $H_{\mu}$  при изменении давления на входе в конфузур.

Как следует из рисунка 6, микротвердость обработанной поверхности  $H_{\mu}$  уменьшается от 2 350 до 1 950 МПа при изменении  $L$  от 15 до 135 мм. Уменьшение  $H_{\mu}$  объясняется тем, что силовое воздействие уменьшается по мере удаления обрабатываемой поверхности от конфузора.

На рисунке 7 представлена зависимость изменения микротвердости от скорости струи рабочей жидкости  $V_{стр}$ .

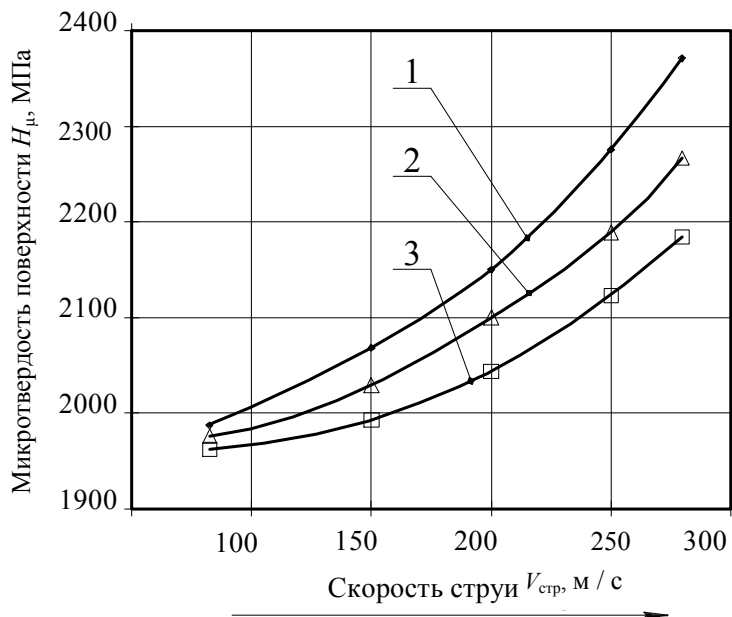
Из анализа данных рисунка 7 видно, что микротвердость обработанной поверхности увеличивается от 1 970 до 2 360 МПа при увеличении скорости струи от 70 до 270 м / с. Микротвердость возрастает в среднем на 25÷30 % по отношению к исходной величине ( $H_{\mu 0} = 1\ 800 \div 1\ 900$  МПа). Увеличение  $H_{\mu}$  объясняется увеличением наклепа обработанной поверхности, что связано с ростом кинетической энергии струи рабочей жидкости при возрастании скорости  $V_{стр}$ . При этом с увеличением расстояния  $L$  до обрабатываемой поверхности от 20 до 150 мм при скорости струи 100 м / с отмечается практически незначительное уменьшение  $H_{\mu}$  от 2 000 до 1 960 МПа. При скоростях 250÷270 м / с снижение микротвердости с ростом расстояния  $L$  отмечается более существенное — от 2 320 до 2 140 МПа, т. е. в среднем на 10÷12 %.

Одним из основных параметров при исследовании пленочного покрытия является его адгезионная прочность, определяемая в момент разрушения индентором (рисунок 8).



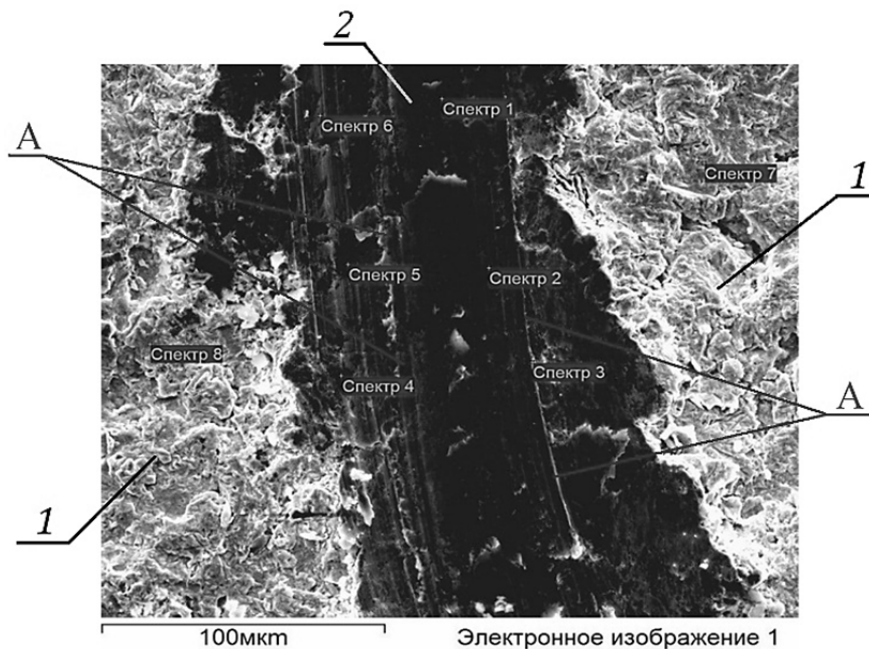
1 —  $p_{вх} = 18$  МПа; 2 —  $p_{вх} = 23$  МПа; 3 —  $p_{вх} = 32$  МПа;  
 $K_b = 3$  %;  $K_n = 10^{-5}$  %;  $K_{к.с} = 2$  %; остальное — вода;  
 материал — ВСтЗсп4

**Рисунок 6. — Зависимость микротвердости поверхности  $H_{\mu}$  от расстояния  $L$**



1 —  $L = 20$  мм; 2 —  $L = 70$  мм; 3 —  $L = 150$  мм;  $K_b = 3\%$ ;  
 $K_n = 10^{-5}\%$ ;  $K_{к.с} = 2\%$ ; остальное — вода; материал — ВСтЗсп4

**Рисунок 7. — Зависимость микротвердости поверхности  $H_{\mu}$  от скорости струи  $V_{стр}$**



1 — участки поверхности гребного винта с неразрушенным пленочным покрытием; 2 — вид участка поверхности гребного винта после разрушения индентором пленочного покрытия

**Рисунок 8. — Внешний вид защитного пленочного покрытия, разрушенного на очищенной поверхности гребного винта после проведения испытаний на адгезионную прочность**

При ширине царапины 105 мкм и критической нагрузке 0,5 Н адгезионная прочность пленочного покрытия составила 28 МПа. Рисунок 8 подтверждает наличие пленочного покрытия на участках 1 обработанной поверхности гребного винта. Здесь же видны следы А, которые образовались при перемещении индентора в процессе разрушения пленочного покрытия на участке 2 поверхности гребного винта.

Эффективность метода гидроабразивной очистки, а также стойкость обработанной поверхности к образованию очагов повторной коррозии была подтверждена с помощью визуального наблюдения. Изменения, происходившие на поверхности обработанного гребного винта во времени, фиксировались последовательным фотографированием (см. рисунок 2, б). Визуальное наблюдение позволило фиксировать изменение внешнего вида поверхности металла, при этом отмечено, что в течение как минимум трех недель после обработки металлическая поверхность гребного винта сохраняла матовый цвет, очаги возникновения повторной коррозии отсутствовали.

**Заключение.** Проанализированы преимущества и недостатки основных технологий очистки металлических поверхностей от коррозии, применяемых как за рубежом, так и в Республике Беларусь. Проведенный анализ позволил разработать новый отечественный способ борьбы с коррозией.

Приведены результаты очистки поверхности гребного винта от коррозии по новой технологии — ГАО. Установлено наличие защитного пленочного покрытия, в состав которого входят компоненты рабочей жидкости, которой производилась обработка. Защитное покрытие обладает высокой адгезионной прочностью и оптимальным показателем шероховатости поверхности.

#### Список цитируемых источников

1. Технология судостроения / В. Л. Александров [и др.] ; под общ. ред. А. Д. Гармашева. — СПб. : Профессия, 2003. — 341 с.
2. Неверов, А. С. Коррозия и защита материалов : учеб. пособие / А. С. Неверов, Д. А. Родченко, М. И. Цырлин. — Минск : Высш. шк., 2007. — 221 с.
3. Филипчик, А. В. Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты стальных изделий от коррозии с использованием в составе рабочей жидкости бентонитовой глины : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / А. В. Филипчик ; Белорус. нац. техн. ун-т. — Минск, 2013. — 146 л.
4. Влияние поверхностной пластической деформации, вызванной дробеструйной обработкой, на коррозионное поведение низколегированной стали / Kovaci H. [etс.] // The effect of surface plastic deformation produced by shot peening on corrosion behavior of a low-alloy steel. Surface and Coat. Technol. — 2019. — С. 78—86.
5. Itasse Stephane. Международная выставка по промышленной очистке Parts2clean. Dafur lohnt sich die Parts2clean // Maschinenmarkt. — 2019. — V. 125. — С. 10—13.
6. Димов, Ю. В. Производительность и качество обработки плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками / Ю. В. Димов, Д. Б. Подашев // Металлообработка. — 2019. — № 5. — С. 3—10.
7. Очистка поверхностей деталей. Eine trockene Angelegenheit // Ind.-Anz. — 2019. — № 28. — С. 52—55.
8. Станок для гидроабразивной обработки // Waterjet series bundled with multi-touch software. Mod. Mach. Shop. — 2019. — V. 92, № 4. — С. 155.
9. Способ создания кавитирующей струи жидкости : пат. 13312 Респ. Беларусь : МКИ В 08В 3/04, В 63В 59/00 / И. В. Качанов, В. Н. Яглов, В. К. Недбальский, А. В. Филипчик ; дата публ.: 30. 06. 2010.
10. Способ создания кавитирующей струи жидкости : пат. 14239 Респ. Беларусь : МКИ В 08В 3/04, В 63В 59/00 / И. В. Качанов, В. К. Недбальский, И. М. Шаталов, А. В. Филипчик ; дата публ.: 30.04.2011.
11. Способ очистки металлических поверхностей : пат. 21512 Респ. Беларусь : МКИ В 08В 3/02, В 08В 3/04 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. В. Филипчик, А. С. Исаенко ; дата публ.: 30.12.2017.
12. Состав рабочей жидкости для гидродинамической очистки металлических поверхностей от коррозии перед лазерной резкой : пат. 21455 Респ. Беларусь : МКИ В 08В 3/02, В 08В 3/04 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, В. Н. Яглов, А. В. Филипчик ; дата публ.: 30.10. 2017.

УДК 621.9.01.001.5

**М. И. Михайлов**, доктор технических наук, профессор;**Н. Э. Тетерич; В. И. Воробей**Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»  
пр. Октября, 48, 246746 Гомель, Республика Беларусь, +375 (23) 247 91 61, mihailov@gstu.by

## К ВОПРОСУ О ДИАГНОСТИКЕ РЕЗЦОВ ПО СИЛЕ РЕЗАНИЯ В УСЛОВИЯХ РОБОТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Рассмотрена эффективность использования сил резания в качестве параметра диагностики резцов при чистовой обработке для условий роботизированного технологического комплекса. Приведены результаты экспериментальных исследований сил резания и получены коэффициенты эмпирических зависимостей силы резания от подачи и глубины резания. Установлена связь между силами резания и параметрами режимов обработки.

**Ключевые слова:** резание; точение; диагностика; резцы; силы резания; износ режущих кромок.

Рис. 3. Табл. 2. Библиогр.: 15 назв.

**M. I. Mikhailov**, Doctor of Technical Sciences, Professor;**N. Э. Teterich; V. I. Vorobei**Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, 48 October Ave.,  
246746 Gomel, the Republic of Belarus, +375 (23) 247 91 61, mihailov@gstu.by

## TO THE QUESTION OF CUTTERS DIAGNOSTICS BY CUTTING FORCE IN CONDITIONS OF A ROBOTIC TECHNOLOGICAL COMPLEX

The efficiency of using cutting forces as a parameter for diagnostics of cutters during finishing in conditions of RTC is considered. The results of experimental studies of cutting forces are given and the coefficients of empirical dependences of the cutting force on the feed and the depth of cut are obtained. The relationship between the cutting forces and the parameters of the processing modes has been established.

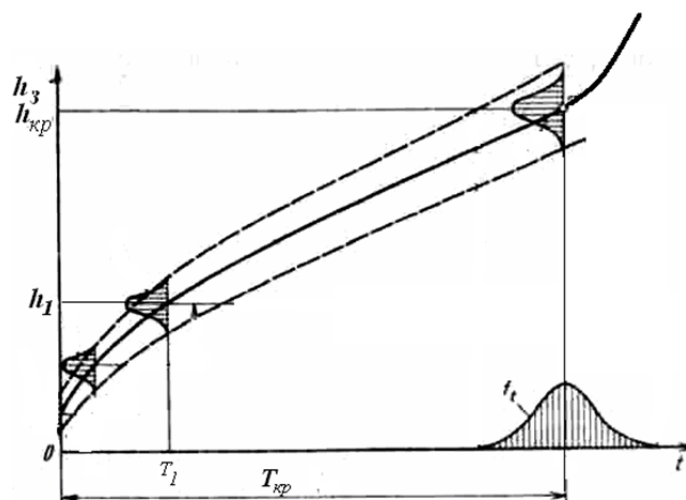
**Key words:** cutting; turning; diagnostics; cutters; cutting forces; wear of cutting edges.

Fig. 3. Table 2. Ref.: 15 titles.

**Введение.** Износ режущего инструмента оказывает значительное влияние на эффективность операций механической обработки [1—10]. Время обработки и действующие силы резания влияют на характер процесса износа, который, в свою очередь, связан со стойкостью инструмента [2; 3; 7—15].

В большинстве исследований рассматриваются две основные формы износа — износ по задней поверхности и износ в виде лунки на передней поверхности инструмента [3; 5; 7; 8; 10; 12].

В процессе резания инструмент изнашивается вследствие трения между стружкой и передней поверхностью, а также между заготовкой и задней поверхностью, т. е. в процессе резания происходит удаление микрочастиц с контактных поверхностей, а также микровыкрашивание режущей кромки. Ни один из известных инструментальных материалов не может противостоять трению в условиях высоких температур и давлений без определенных изменений его первоначальной формы с течением времени. Типовая кривая износа по задней поверхности представлена на рисунке 1. Критическое значение износа часто приводится в справочной литературе.

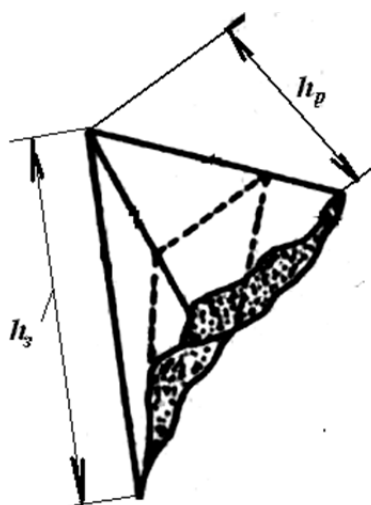


**Рисунок 1. — Кривые износа инструмента по задней поверхности**

Как видно на рисунке 1, чтобы определить остаточный период стойкости, необходимо знать величину износа по задней поверхности в произвольный период времени  $T_1$ . Величину износа определяют различными методами, как прямыми, так и косвенными измерениями. В качестве косвенных чаще всего используются методы на основе тензоизмерений, при которых тензодатчики размещаются на элементах приводов станков или на элементах оснастки. Использование таких методов требует определения связи между силой резания и размерами площадки износа, которая зависит от режимов обработки и обрабатываемых материалов.

Целью настоящего исследования было установление связи между износом режущей кромки и силами резания, а также возможности использования измеряемых значений силы резания для косвенной оценки износа режущей кромки для условий робототехнических комплексов.

Тщательное изучение износа по задней поверхности показывает, что этот очаг износа состоит из двух самостоятельных участков — износа вершины и износа непосредственно задней поверхности (рисунок 2).



**Рисунок 2. — Геометрия износа режущего инструмента**

В некоторых случаях износ вершины следует рассматривать отдельно от износа по задней поверхности (см. рисунок 2). Иногда износ по вершине протекает более быстро, чем износ по задней поверхности, особенно при обработке материалов с высокой абразивной способностью и при использовании инструментов с малым радиусом при вершине. При чистовых операциях точения вершина резца находится в непосредственном контакте с заготовкой, и чрезмерный ее износ может оказывать отрицательное влияние на точность обработки и шероховатость поверхности.

**Материалы и методы исследования.** В случае обработки округление острых углов или затупление вершины приводит к выходу инструментов из строя.

Нарастание площадки износа вызывает изменение силы резания:

$$P_z = P_{H_z} + \Delta P_z, \quad (1)$$

где  $P_z$  — вертикальная составляющая силы резания, кгс;

$P_{H_z}$  — начальное значение силы, определяемое как

$$P_{H_z} = C_1 t S^u, \quad (2)$$

где  $C_1$  — коэффициент, отражающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, скорости резания и условий обработки на силу резания;

$t$  — глубина резания;

$S$  — подача;

$u$  — коэффициент, отражающий влияние подачи на силу резания.

При обработке стали твердосплавным резцом приращение силы резания линейно связано с величиной площадки износа:

$$\Delta P_z = C_u t h_3, \quad (3)$$

где  $\Delta P_z$  — приращение силы резания;

$C_u$  — коэффициент, отражающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, условий обработки и подачи на силу резания;

$h_3$  — величина износа по задней поверхности резца.

Подставив (2) и (3) в (1), получим общее выражение для силы резания:

$$P_z = C_1 t S^u + C_u t h_3. \quad (4)$$

Приращение  $\Delta P_z$  силы резания может быть принято в качестве критерия оценки износа вершины, вызывающего изменение геометрической формы режущей кромки в течение определенного времени работы с определенной подачей.

В любых условиях механической обработки рассматриваются три составляющие силы резания: вертикальная, осевая и радиальная. Измерение этих трех сил проводилось в следующем порядке.

В момент начала резания, т. е. в нулевой момент времени, снимается показание динамометра и рассчитывается значение силы резания  $P_z$ , соответствующее работе острого резца, для площади среза  $A_0$ .

Таким же образом снимаются показания для осевой  $P_x$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания.

После определенного времени, например 5 мин, измеряется и рассчитывается новое значение силы резания. Это значение соответствует силе  $P_{z_z}$  (в кгс) с учетом износа, который резец получит за 5 мин. Действительная площадь среза (в  $\text{мм}^2$ ) меньше расчетной на величину  $\Delta A$  (в  $\text{мм}^2$ ), т. е. на величину припуска, несрезаемого с поверхности заготовки из-за радиального износа инструмента. Реальная площадь среза  $A_p = A_0 - \Delta A$ . На рисунке 3 видно, что несрезаемая площадь может быть представлена в виде трапеции, т. е. площадь  $\Delta A$  равна площади KLMN.

Удельная сила резания  $K_p$  (кгс /  $\text{мм}^2$ ), необходимая для удаления слоя  $\Delta A$ , является постоянной для данного обрабатываемого материала при постоянном значении подачи. Приращение  $\Delta P$  силы, необходимой для удаления слоя  $\Delta A$ , может быть определено из выражения

$$\Delta P_z = K_p \Delta A$$

где  $\Delta P_z$  — величина силы, которую требуется добавлять к вертикальной составляющей силы резания, действующей в течение времени резания (в данном случае  $T_m = 5$  мин).

Полное значение вертикальной составляющей силы, действующей на инструмент в течение определенного времени ( $T_m = 5$  мин), может быть получено из выражения  $P_z = P_{z_H} + \Delta P_z$ .

Измерения и расчет в такой последовательности выполнялись для разных периодов времени  $T_m$  (10, 17, 25, 35, 45, 60 мин).

**Результаты исследования и их обсуждение.** При математическом расчете сил общее уравнение для главной составляющей силы резания принимается в виде  $P_z = P_{z_H} + \Delta P_z$ .

Рассмотрим члены  $P_{z_H}$  и  $\Delta P_z$  этого уравнения (см. рисунок 3).

Начальное значение силы  $P_{z_H}$  может быть определено из выражения

$$P_{z_H} = C_i t^u,$$

где  $C_i$  — постоянная, зависящая от свойств инструментального и обрабатываемого материалов, скорости резания и условий обработки;

$u$  — постоянная, зависящая от подачи и вида операции точения.

По мере увеличения времени обработки измеряемое значение  $P_{z_H}$  уменьшается, однако приращение  $\Delta P_z$  растет в связи с увеличением износа, поэтому полное значение силы  $P_z$  увеличивается. Значения  $P_{z_H}$ , измеренные в опытах, приведены в таблице 1, по которой рассчитаны значения  $C_i$ .

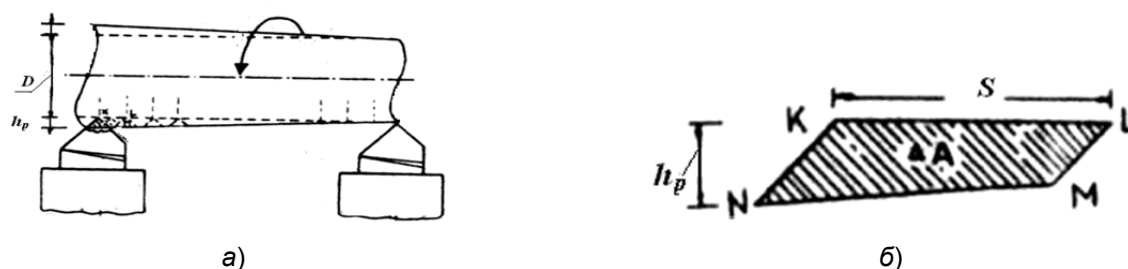


Рисунок 3. — Влияние износа инструмента на образование поверхности заготовки: а — схема обработки; б — сечение несрезаемого слоя

Начальные значения  $P_H$ , т. е. при  $T_m = 0$ , измерялись во всех опытах. Установлено, что все последующие значения  $P_H$  были меньше первоначального, что связано с увеличением действительной силы  $P_z$  резания. Значение  $P_{zH}$ , измеренное при  $T_m = 0$ , дает величину действительной силы  $P_z$ , поскольку приращение  $\Delta P_z$  равно нулю.

Значение постоянной  $C_i$  определялось в каждом опыте, включающем семь проходов, по среднему значению  $P_{zH}$  из выражения

$$C_i = P_H / tS^u.$$

В каждом опыте определяли значения  $P_{zH}$  (по семи проходам), а также значения  $tS^u$ . Значения  $t$  и  $S$  по всем опытам приведены в таблице 1.

Значение  $u$  было постоянным во всех опытах и равным 0,75. Таким образом, для каждого опыта определяли значение  $C_i$ . В таблице 1 приводятся значения  $C_i$  для 16 опытов, а также расчетное значение.

Значение  $\Delta P_z$  возрастает с течением времени обработки в связи с постоянным увеличением износа вершины. Можно принять, что величина  $\Delta P_z$  пропорциональна подаче  $S$  и максимальной величине износа  $h_p$  вершины, т. е.

$$\Delta P_z = Sh_p, \quad (5)$$

что можно также представить в следующем виде:

$$\Delta P_z = C_S Sh_p, \quad (6)$$

где  $C_S$  — постоянный коэффициент, отражающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, условий обработки и скорости на силу резания.

Т а б л и ц а 1. — Определение среднего значения  $C_i$

Номер опыта	$P_{zH}$ , Н	$t$ , мм	$S$ , мм / об	$C_i = P_H / tS^u$
1	163,5	0,5	0,09	199,0
2	369,5	1,0	0,14	161,4
3	790,0	1,5	0,27	140,6
4	2120,0	2,0	0,62	151,7
5	151,0	0,5	0,09	183,8
6	328,0	1,0	0,14	143,3
7	696,0	1,5	0,27	123,8
8	2080,0	2,0	0,62	148,8
9	124,0	0,5	0,09	150,9
10	313,0	1,0	0,14	136,8
11	712,0	1,5	0,27	126,7
12	1827,0	2,0	0,62	130,7
13	127,0	0,5	0,09	154,5
14	283,0	1,0	0,14	122,8
15	721,0	1,5	0,27	128,3
16	1704,0	2,0	0,62	121,9

Примечание. Среднее значение  $C_i$  составило 145,0.



Выражения (5) и (6) экспериментально не подтвердились. На основании опытных данных значения  $C_S$  и  $\Delta P_z$  могут быть получены из выражения

$$C_S = \frac{\Delta P_z}{S^{0,5} h_p} \quad (7)$$

Уравнение (7) получено на основании 112 опытов. В таблице 2 приведены средние значения всех параметров.

Из полученных экспериментальных данных  $C_S = 116$ .

При известных значениях  $P_{zH}$  и  $\Delta P_z$  можно рассчитать полное значение действующей силы:

$$P_z = P_{H_z} + \Delta P_z = C_z t S^u + C_s h_3 S^{0,5}.$$

Тогда выражение, связывающее силу резания и износ, будет иметь следующий вид:

$$h_3 = \frac{P_z - 4,64 t \sqrt[4]{S^3}}{116 \sqrt{S}}.$$

Данные таблицы 2 позволяют заключить, что, измеряя силу резания, можно определить величину износа и по критическому ее значению рассчитать остаточный период стойкости  $\Delta T$ :

$$\Delta T = T_1 \left( \frac{h_{кр_3}}{h_1} - 1 \right),$$

где  $T_1$  — рассматриваемый промежуток времени;

$h_{кр_3}$  — критическое значение величины износа;

$h_1$  — величина износа инструмента по задней поверхности в рассматриваемый промежуток времени.

Т а б л и ц а 2. — Результаты экспериментов

Время резания, мин	Подача $S_0$							
	0,09		0,14		0,27		0,62	
	$C_z = 386,6$		$C_z = 310,0$		$C_z = 223,2$		$C_z = 147,3$	
	$\Delta P_z$	$h_{3cp}$	$\Delta P_z$	$h_{3cp}$	$\Delta P_z$	$h_{3cp}$	$\Delta P_z$	$h_{3cp}$
5	2,19	0,0632	4,89	0,1129	5,68	0,0943	22,18	0,2429
10	4,947	0,1422	5,26	0,1213	7,55	0,1253	37,80	0,4140
17	10,63	0,3062	13,19	0,304	19,41	0,3222	52,73	0,5774
25	10,88	0,3129	18,57	0,4271	12,27	0,2037	52,09	0,5704
35	11,03	0,3171	10,76	0,2480	31,77	0,5273	66,67	0,7301
45	9,673	0,2795	14,73	0,3396	53,69	0,8910	99,08	1,0850
60	15,287	0,4328	19,30	0,4449	53,39	0,8843	112,97	1,2377

**Заключение.** Экспериментально определены значения постоянных, входящих в зависимости сил резания. Установлены эмпирические зависимости, связывающие силу резания с максимальной величиной износа резца и остаточным периодом стойкости инструмента в условиях робототехнических комплексов.

#### Список цитируемых источников

1. Лищинский, Л. Ю. Структурный и параметрический синтез гибких производственных систем / Л. Ю. Лищинский. — М. : Машиностроение, 1990. — 312 с.
2. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И. Л. Фадюшин [и др.]. — М. : Машиностроение, 1990. — 272 с.
3. Сборный твердосплавный инструмент / Г. Л. Хаега [и др.] ; под общ. ред. Г. Л. Хаега. — М. : Машиностроение, 1989. — 256 с.
4. Нодельман, М. О. Идентификация периодичности смены режущего инструмента / М. О. Нодельман // Вестн. машиностроения. — 1989. — № 7. — С. 46—48.
5. Маслов, А. Ф. Конструкции и эксплуатация прогрессивного инструмента / А. Ф. Маслов. — М. : ИТО, 2006. — 169 с.
6. Автоматизация выбора режущего инструмента для станков с ЧПУ / В. И. Аверченков [и др.]. — Брянск : БГТУ, 2010. — 148 с.
7. Артамонов, Е. В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов / Е. В. Артамонов. — Тюмень : ТюмГНГУ, 2003. — 192 с.
8. Григорьев, С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента / С. Н. Григорьев. — М. : Машиностроение, 2011. — 368 с.
9. Михайлов, М. И. Повышение надежности сборного режущего инструмента / М. И. Михайлов. — Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. — 272 с.
10. Васин, С. А. Проектирование сменных многогранных пластин. Методологические принципы / С. А. Васин, С. Я. Хлудов. — М. : Машиностроение, 2006. — 352 с.
11. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. М. Дальского [и др.]. — М. : Машиностроение, 2001. — Т. 2. — 944 с.
12. Грановский, Г. И. Резание металлов : учеб. для машиностр. и приборостр. специальностей вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. — М. : Высш. шк., 1985. — 304 с.
13. Справочник конструктора-инструментальщика / В. И. Баранчиков [и др.] ; под общ. ред. В. А. Гречишниковой и С. В. Кирсанова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 2006. — 542 с.
14. Гузеев, В. И. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезернорасточных станков с числовым программным управлением : справочник / В. И. Гузеев, В. А. Батуев, И. В. Сурков. — М. : Машиностроение, 2007. — 368 с.
15. Васин, С. А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании / С. А. Васин. — М. : Машиностроение, 2006. — 384 с.

Поступила в редакцию 14.10.2021.

УДК 621.926

**Л. А. Сиваченко<sup>1</sup>**, доктор технических наук, профессор;  
**Г. М. Абдукаликова<sup>2</sup>**; **Л. Л. Сотник<sup>3</sup>**; **И. М. Дыдышко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», пр-т Мира, 43, 212000 Могилев, Республика Беларусь, +375 (44) 792 86 83, 228011@mail.ru

<sup>2</sup>Некоммерческое акционерное общество «Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева», ул. Сатпаева, 2, 10008 Нур-Султан, Республика Казахстан, abdukalikova\_gm@mail.ru

<sup>3</sup>Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 803 45 28, din037@yandex.by, +375 (33) 608 78 12, dydyshko-1991@mail.ru

## ПРОБЛЕМЫ, ЗАДАЧИ И ПУТИ РАЗВИТИЯ ПРУЖИННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Пружинные аппараты представляют собой перспективный класс технологических машин для проведения различных процессов переработки дисперсных материалов и сред. Некоторые потенциальные возможности пружинных мельниц, смесителей и диспергаторов уже исследованы, но целый ряд из них предстоит изучить в целях практического использования. Для разработки эффективных подходов и направлений дальнейшего развития пружинных аппаратов в статье дается практическая оценка их современного уровня.

**Ключевые слова:** пружинный аппарат; мельница; смеситель; технологический процесс; рабочий орган; измельчение; механизм разрушения; дисперсный состав; эффект механоактивации.

Рис. 7. Библиогр.: 12 назв.

**L. A. Sivachenko<sup>1</sup>**, Doctor of Technical Sciences, Professor;  
**G. M. Abdukalikova<sup>2</sup>**; **L. L. Sotnik<sup>3</sup>**; **I. M. Dydyshko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Inter-State Educational Institution of Higher Education «Belarusian-Russian University», 43 Mira Ave., 212000 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (44) 792 86 83, 228011@mail.ru

<sup>2</sup>Non-profit joint-stock company “L. N. Gumilyov Eurasian National University”, 2 Satpayev Str., 10008 Nur-Sultan, the Republic of Kazakhstan, abdukalikova\_gm@mail.ru

<sup>3</sup>Educational institution “Baranovichi State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (29) 803 45 28, din037@yandex.by, +375 (33) 608 78 12, dydyshko-1991@mail.ru

## PROBLEMS, TASKS AND WAYS OF DEVELOPMENT OF SPRING TECHNOLOGICAL APPARATUS

Spring apparatus represent a promising class of technological machines for carrying out various processes of processing dispersed materials and media. Some potential capabilities of spring mills, mixers and dispersants have already been investigated, but a number of them are to be explored with the aim of practical use. To develop effective approaches and directions of the further development of spring apparatus, the article provides a practical assessment of their current level.

**Key words:** spring apparatus; mill; mixer; technological process; working body; crushing; destruction mechanism; dispersed composition; mechanical activation effect.

Fig. 7. Ref.: 12 titles.

**Введение.** В современных технологиях применяется большое количество различных аппаратов, осуществляющих переработку сырья и материалов. В качестве такого оборудования широкое распространение в промышленности имеют мельницы, смесители, дезинтеграторы, диспергаторы, механоактиваторы, грохоты, виброуплотнители, грануляторы и др. Прогресс в области совершенствования технической базы таких машин требует разработки но-

вых принципов и механизмов воздействия на перерабатываемые среды и воплощения их в конкретные конструкции. В качестве одного из направлений развития технологической сферы может быть создание и использование многоцелевых пружинных аппаратов.

**Материалы и методы исследования.** Технологическая универсальность пружин как рабочих органов позволяет использовать их в качестве основы для создания различных аппаратов: мельниц, смесителей, грохотов, механоактиваторов, питателей, виброуплотнителей, гидроклассификаторов и др. [1]. Если рассматривать эффективность применения и потенциал пружинных аппаратов, то он в значительной степени зависит от условий работы пружин, прежде всего их нагруженности. В целях пояснения такого положения представим основные варианты поведения пружин при выполнении ими различных технологических функций (рисунок 1). Отличительной особенностью этих вариантов является тот факт, что усложнение кинематики поведения отдельных звеньев пружинных рабочих органов приводит к интенсификации механизмов воздействия на обрабатываемую среду и расширению их технологических возможностей.

Рабочий процесс пружинного грохота происходит при подаче зернистого материала внутрь наклонно установленной вибрирующей пружины, регулируемые зазоры между витками которой образуют просеивающие «отверстия», через которые проходит подрешетный продукт, а крупная фракция удаляется из ее нижней части. Для обеспечения требуемой производительности грохота его просеивающая часть состоит из набора цилиндрических пружин или их секций [1].

Транспортирование материала пружинными рабочими органами осуществляется за счет угла подъема витков и имеет достаточно широкое использование в технике в качестве питателей к различным технологическим машинам [2]. Для уплотнения бетонных смесей пружинному рабочему органу от кривошипно-шатунного механизма привода сообщаются осевые высокочастотные колебания, которые передаются в уплотняемую среду. Пружинный рабочий орган выполняет не только функцию получателя колебаний, но также производит дезагрегацию частиц и их механоактивацию между витками [3].

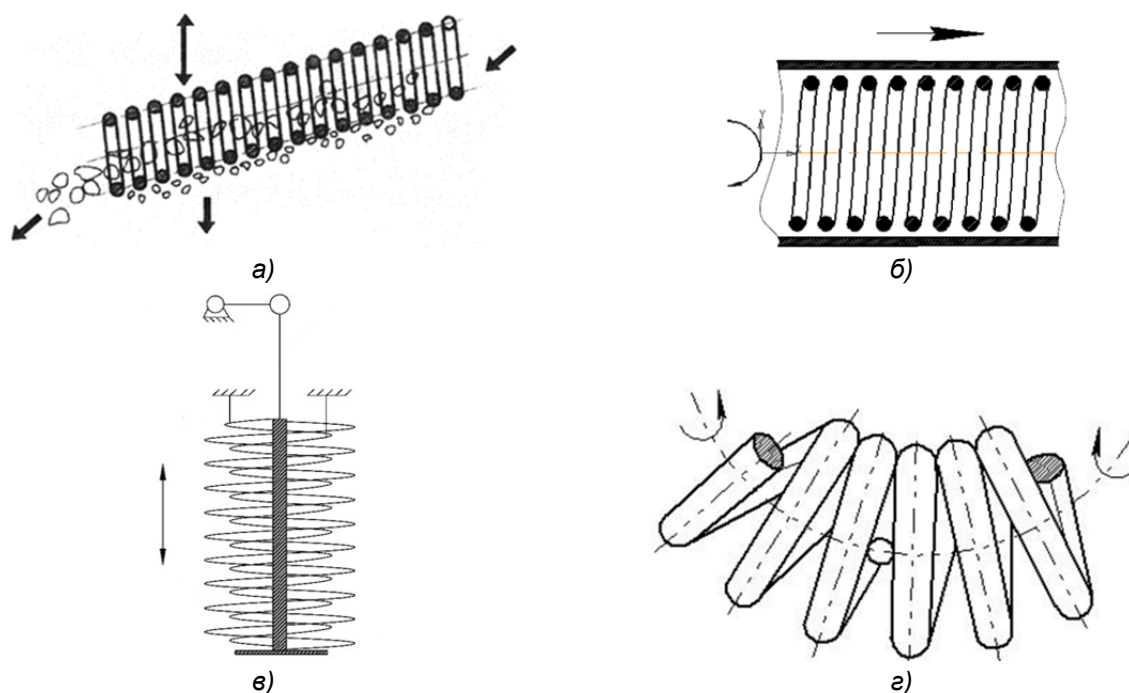


Рисунок 1. — Основные варианты выполнения пружинами технологических функций:  
а — грохочение; б — транспортирование; в — уплотнение; г — помол

Принцип действия пружинных мельниц основан на разрушении материала в межвитковом пространстве пружины в результате воздействия на него сжимающе-сдвиговых усилий и наложения виброколебаний. Такой механизм позволяет также, помимо разрушения материала, производить диспергированное смешивание, микрогранулирование и механоактивацию при одновременной высокой точности дозирования. Организованный таким образом механизм нагружения при вращении изогнутой пружины создает эффект «схватывания» частиц, а адаптивный характер управления ее энергосиловыми параметрами дает возможность настройки на требуемые условия осуществления технологических процессов.

Морфологический анализ представленных схем (см. рисунок 1) показывает, что при грохочении пружина находится в статическом состоянии, при работе в качестве питателя испытывает напряжение кручения, при уплотнении материала — напряжения изгиба, при помоле витки изогнутой к кинематически деформируемой пружины подвержены сложному нагружению и работают в условиях знакопеременных воздействий как со стороны внутренних сил, так и внешних факторов. Работа пружинного аппарата в качестве мельницы является наиболее энергонапряжённой и характеризуется, с одной стороны, повышенными технологическими возможностями, а с другой стороны, тяжёлыми условиями эксплуатации, обусловленными износом и знакопеременными нагрузками, в том числе в режиме интенсивных колебаний [1; 4].

Величина концентрации энергии непосредственно в рабочей зоне пружинной мельницы достигает  $5 \text{ кВт} / \text{дм}^3$ , что позволяет использовать её даже в качестве аппарата для сверхтонкого помола, проведения процессов механоактивации и получения высококачественных порошковых композиций. К настоящему времени изготовлено более 900 единиц пружинных мельниц, смесителей, диспергаторов и механоактиваторов вращательного действия, примерно 60 различных конструкций производительностью от  $1 \text{ кг} / \text{ч}$  до  $50 \text{ т} / \text{ч}$  [1; 5]. Примеры конструктивного исполнения наиболее применяемых пружинных аппаратов с кинематически деформируемыми рабочими органами приведены на рисунке 2.

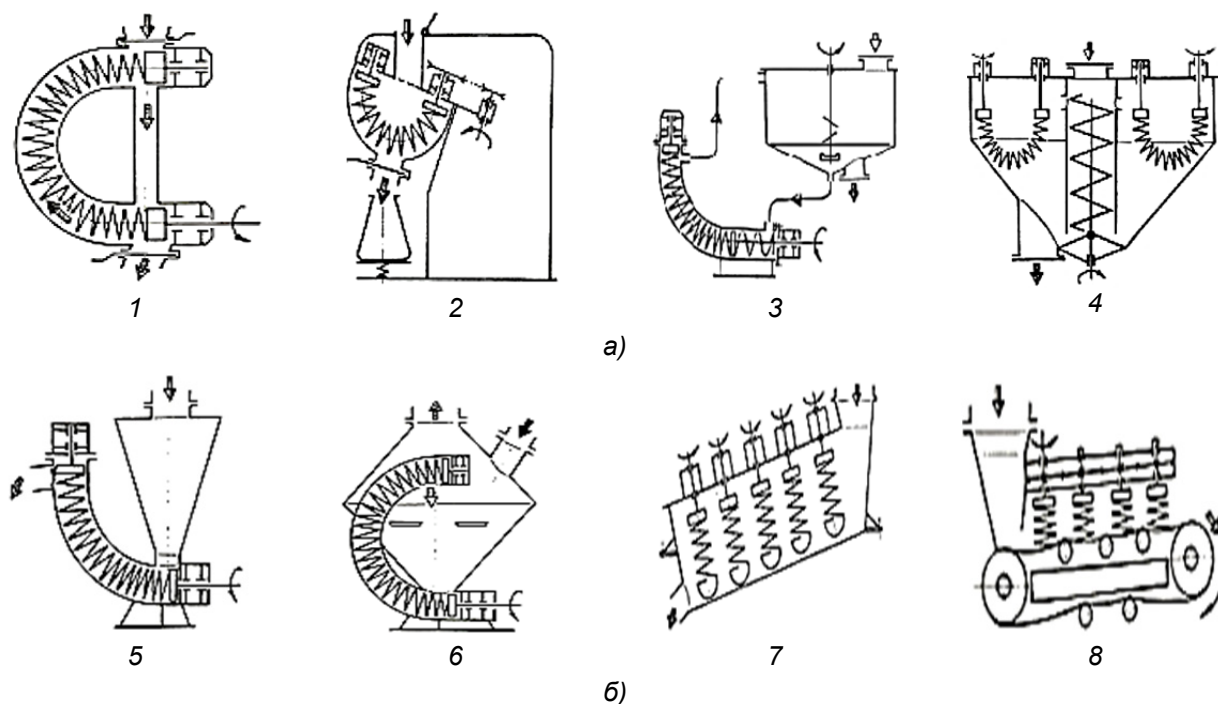


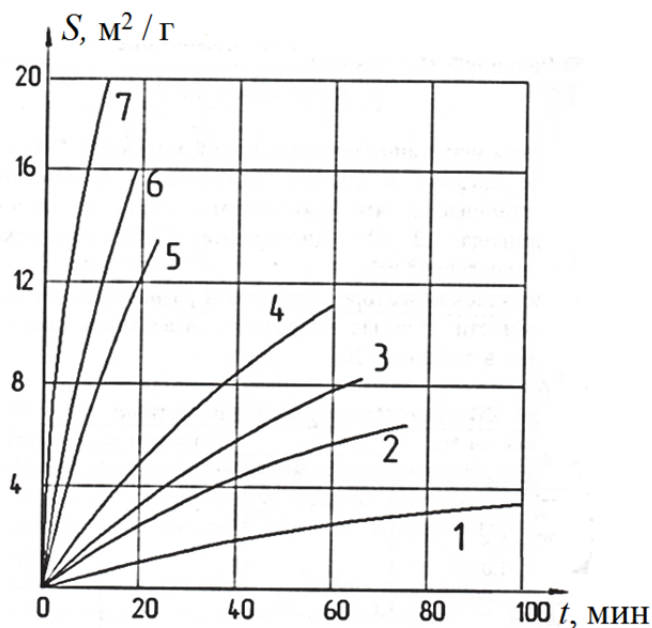
Рисунок 2. — Конструктивные исполнения пружинных аппаратов:  
 а — аппараты циклического действия; б — аппараты непрерывного действия

Приведенные на рисунке 2 схемы 1, 2 отображают конструкции, в которых рабочий орган замыкает в трубе рабочий цикл и помещен в небольшую емкость, схема 3 — проточно-циркуляционный аппарат с вынесенной емкостью, схема 4 — вариант установки пружинных рабочих органов в емкости с внутренним рециклом.

На схеме 5 показан аппарат, работающий по открытому циклу, на схеме 6 — мельница с сепарационной камерой, на схемах 7, 8 — исполнение агрегатов на основе набора пружинных рабочих органов, установленных в наклонном лоткообразном корпусе и над транспортерной лентой соответственно.

Пружинные мельницы, смесители и диспергаторы объединены единым исполнением рабочего органа и в целом характеризуются очень высокой технологической эффективностью. Об этом можно судить по независимым оценкам специалистов акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Веденева» (Санкт-Петербург) [2] по размолоспособности, оцененной на основе кинетики помола кварцевого песка в различных конструкциях мельниц. В качестве исследуемых аппаратов использовали пружинные мельницы, выполненные по схемам 1, 2 рисунка 2. Результаты сопоставительных испытаний приведены на рисунке 3.

Представленные материалы характеризуют пружинные мельницы как эффективный класс технологических машин со специфическими условиями работы. Это накладывает ряд дополнительных требований по исследованию их рабочих процессов и проектированию аппаратов промышленного назначения.



1 — шаровая лабораторная мельница; 2 — вибрационная мельница; 3 — аттриктор; 4 — пружинная мельница, схема 2 в таблице 1; 5 — планетарная мельница «Пульверизетте»; 6 — пружинная мельница, схема 1 в таблице 1; 7 — дифференциальная центробежная мельница

**Рисунок 3. — Результаты измельчения кварцевого песка в различных мельницах**

**Результаты исследования и их обсуждение.** При проектировании пружинных аппаратов важно определить их рациональные параметры, прежде всего энерготехнологические, которые максимально влияют на потенциальные возможности по переработке различных материалов.

В качестве основных энерготехнологических показателей пружинных мельниц были приняты следующие: усилие разрушения, потребляемая мощность, энергонапряжённость, удельная энергоёмкость, удельная производительность, удельный наamol измельчительной гарнитуры.

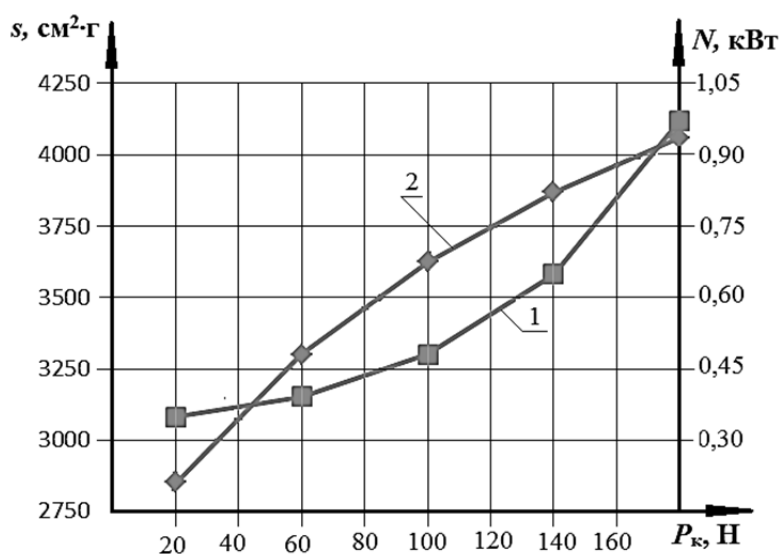
Установлено, что усилие разрушения зависит, прежде всего, от геометрических параметров винтового рабочего органа и крупности частиц измельчаемого продукта и определяет как кинетику и интенсивность процесса измельчения, так и его энергетические характеристики. Экспериментальные результаты влияния межвиткового давления  $P_k$  на потребляемую мощность  $N$  и удельную поверхность  $s$  измельчаемого кварцевого песка представлены на рисунке 4 [6].

Выполненные исследования дают основания считать, что в пружинных аппаратах с рабочими органами, имеющими диаметры сечений витков  $D_b$  от 3 до 14 мм, возможно проводить измельчение продуктов с прочностью на сжатие до 200 МПа и размерами частиц до  $0,7...0,8 D_b$  при заполнении рабочей камеры 30...40 %, что соответствует нормальной работе этих аппаратов. При этом дополнительных методов интенсификации рабочих процессов не проводилось.

Мощность, потребляемую при работе пружинной мельницы, определяли из выражения

$$N_{\Sigma} = N_p + N_t + N_{тр} + N_k + N_{кор},$$

- где  $N_p$  — мощность, расходуемая непосредственно на процесс разрушения материала;  
 $N_t$  — мощность, затрачиваемая на внутреннее трение при изгибе витков (1...3 % от подводимой мощности);  
 $N_{тр}$  — мощность, затрачиваемая на транспортирование материала внутри помольной камеры;  
 $N_k$  — мощность, затрачиваемая на сопротивление качения витков друг по другу;  
 $N_{кор}$  — мощность, затрачиваемая на трение материала о стенки рабочей камеры.



**Рисунок 4.** — Результаты влияния межвиткового давления на потребляемую мощность (кривая 1) и удельную поверхность (кривая 2) измельчаемого кварцевого песка

Работа пружинного рабочего органа в условиях интенсивных колебаний при резонансных частотах требует учета влияющих на неё факторов. Для этого можно использовать формулу приближенного определения низшей частоты собственных колебаний пружины [7]:

$$\rho_0 = \frac{6\,336d_0}{\left(\frac{H_0^2}{\varphi + 1\,440} - \frac{f^2}{2}\right)} \sqrt{\frac{E \operatorname{tg} \alpha_0 \sin \alpha_0}{8(2 + \mu)\rho}}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  — низшая частота колебаний (рад / с);  
 $d_0$  — диаметр проволоки (м);  
 $E$  — модуль упругости (Па);  
 $\alpha_0$  — угол подъема витков (град);  
 $H_0$  — высота пружины в исходном состоянии (м);  
 $f$  — расстояние по хорде торцами пружины в деформированном состоянии (м);  
 $\varphi$  — относительный угол поворота торцев (град);  
 $\mu$  — коэффициент Пуассона;  
 $\rho$  — плотность материала пружины (кг / м<sup>3</sup>).

Анализ формулы (1) показывает, что низшую частоту собственных колебаний пружины  $\rho_0$  с инженерной точностью можно считать пропорциональной диаметру проволоки  $d_0$ , корню квадратному из модуля упругости  $E$  и обратно пропорциональной квадрату высоты  $H_0$  и корню квадратному из плотности материала  $\rho$ .

Полученные расчетные значения были использованы для искусственного вывода пружинных рабочих органов в резонансный режим работы продуктов. Для этого использовался метод управляемой деформации пружины путем изменения ее некоторых параметров, в частности, центрального угла изгиба ее оси и продольной деформации. Генерирование таким образом резонанса колебаний позволило увеличить ввод энергии в обрабатываемую среду, а контроль за параметрами вибрации контролировался как зазорами между стенками рабочей камеры и рабочим органом, так и распределением в рабочей зоне обрабатываемого продукта [7]. Такой подход позволяет на 15...25 % интенсифицировать процесс обработки, что выражается в повышении степени помола или качества перемешивания.

Основными факторами, определяющими надежность пружинных аппаратов с кинематически деформируемым рабочим органом, является их наработка на отказ по критерию прочности при циклических нагружениях и износостойкость. Из других видов отказов можно отметить изменение формы рабочих органов, связанное с перегрузкой по крутящему моменту, как при неправильном проектировании, так и при нарушении условий эксплуатации. Наибольшее число отказов связано с недостаточной прочностью рабочих органов при циклическом нагружении [4; 6].

Для оценки долговечности принимаем обобщающий коэффициент снижения степени предела выносливости рабочего органа по отношению к гладкому полированному лабораторному образцу  $K$  [8; 9]:

$$K = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1d}} = \left( \frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_F} - 1 \right) \frac{1}{K_v K_A},$$

где  $\sigma_{-1}$  — предел выносливости при симметричном цикле гладких лабораторных образцов диаметром  $d_0 = 7,5$  мм при изгибе с вращением, изготовленных по ГОСТ 25.502-79 (МПа);

$\sigma_{-1d}$  — предел выносливости детали при симметричном цикле, выраженный в номинальных напряжениях (МПа);



- $K_{\sigma}$  — коэффициент, учитывающий концентрации напряжений;  
 $K_{d\sigma}$  — коэффициент влияния абсолютных размеров поперечного сечения витка пружины;  
 $K_F$  — коэффициент влияния шероховатости поверхности пружинной проволоки;  
 $K_v$  — коэффициент влияния поверхностного упрочнения;  
 $K_A$  — коэффициент анизотропии.

Для исследуемых пружинных рабочих органов с учетом технологии и качества материалов, применяемых при их изготовлении, условий проведения испытаний (температура, износ, коррозия и др.) был проведен расчет сопротивления усталости в соответствии с методикой по ГОСТ 25.504-82 «Расчеты и испытания на прочность».

В качестве анализируемых марок сталей выбраны 65Г и 51ХФА (ГОСТ 14963-78), рассчитанные по приведенной методике кривые усталости для этих сталей приведены на рисунке 5. Здесь по оси абсцисс откладывается количество циклов нагружения  $N$  пружины, по оси ординат — предел выносливости  $\sigma$ . Область значений между кривыми усталости для сталей 65Г и 51ХФА определяет долговечность рабочего органа по усталостной прочности и составляет  $10^6$  циклов, что соответствует 600...800 ч работы мельницы при частоте вращения 2 000...3 000 мин<sup>-1</sup>. Сходимость расчетных и экспериментальных показателей наработки на отказ составляет 10...18 %, что достаточно для инженерных методов проектирования пружинных аппаратов.

Снизить внутреннее напряжение в витках пружины и увеличить количество циклов нагружения можно путем уменьшения центрального угла изгиба и применения устройств, усиливающих жесткость пружины. Повысить надежность рабочих органов можно также за счет снижения частоты вращения и увеличения габаритных размеров пружины. Применение проката проволоки с улучшенной поверхностью, использование последних разработок в металловедении по пружинным сталям и новых методов поверхностной обработки позволит повысить предел выносливости рабочих органов.

Решение по практическому применению таких рабочих органов сводится к выбору баланса между параметрами пружин, в частности, углом и радиусом их изгиба, величиной зазоров и усилий обжатия материала в контактных зонах между витками.

В силу конструктивных особенностей пружинных рабочих органов они могут быть изготовлены только из пружинных материалов, в частности, соответствующих сталей. По этой причине поверхностная твердость витков пружин не может превысить 57...60 HRC, что может приводить к повышенному износу при переработке высокоабразивных материалов [1; 2].

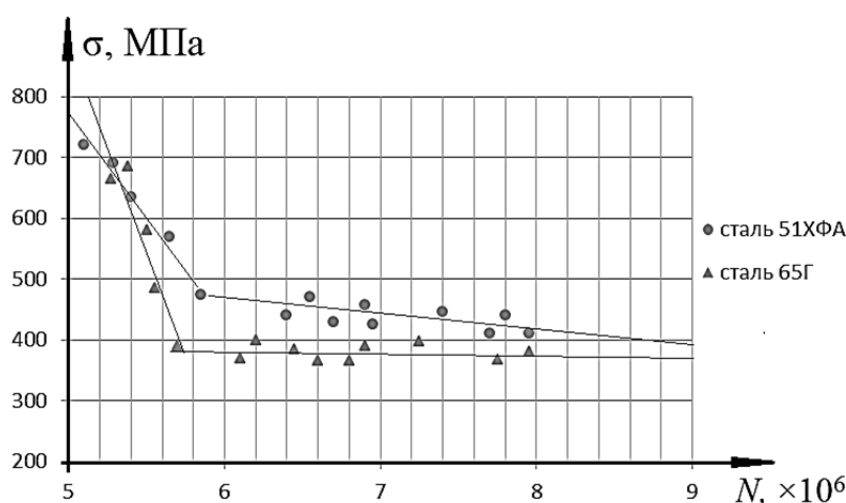


Рисунок 5. — Кривые усталости рабочих органов из пружинных сталей 65Г и 51ХФА

Полный цикл металлографических исследований пружинных рабочих органов показал, что для их изготовления использовать сталь 65Г нецелесообразно, так как она не соответствует по целому ряду критериев, что, в частности, косвенно подтверждается микроструктурой сталей 65Г и 51ХФА, приведенной на рисунке 6. Кроме того, сталь 65Г обладает меньшей твердостью, она характеризуется наличием внутренних дефектов структуры, имеет на поверхности посторонние включения, у нее более высокая шероховатость поверхности.

Установлено, что рабочие органы из стали 65Г имеют износ в 1,5...2,0 выше, а циклическую прочность в 3...8 раз ниже, чем из стали 51ХФА. Рабочие органы из стали 51ХФА при обработке материалов твердостью 4, 6 и 9 единиц по шкале Мооса имеют и удельный помол, определенный на приборе «Магнит 704», соответственно, 0,02...0,04; 0,1...0,12 и 0,65...0,70 % [7].

На данном уровне развития пружинных мельниц их рабочие органы имеют низкую наработку по критерию износа для переработки продуктов повышенной твердости, что требует поиска новых материалов и технологии для изготовления.

Для определения времени нахождения частиц в зоне воздействия рабочего органа под этим временем будем понимать то время, в течение которого частица испытывает силовое воздействие между рабочими поверхностями витков или между одноименными частицами при их «заклинивании» в слое этого материала. Попасть в зону захвата может только та частица, размер которой меньше зазора между нитками в их расходящейся части. Завершением воздействия считается зона, соответствующая минимальному зазору между витками.

Легко видеть, что реальное время нагружения частиц очень мало, особенно при переработке мелкодисперсных материалов, и может составлять  $t = 0,01...0,00016$  с для частот вращения рабочего органа 480...2960 мин<sup>-1</sup>.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что увеличение диаметра рабочего органа и частоты его вращения, а также снижение крупности частиц являются основными факторами уменьшения времени воздействия. Это необходимо для изменения характера воздействия на перерабатываемую среду различной физической природы и создания условий для максимальной эффективности единичных актов разрушения частиц материала [10].

О потенциальных возможностях пружинных мельниц можно судить на примере помола дисульфида молибдена, который является трудноразмалываемым материалом. Полученные результаты, представленные в виде гистограмм на рисунке 7, позволяют рассматривать пружинные аппараты как перспективный вид оборудования именно для тонкого и сверхтонкого помола различных продуктов. При этом установлено, что процесс наиболее интенсивно проходит по мокрому способу, обеспечивает повышение производительности в 2...4 раза по сравнению с сухим и такое же снижение энергоемкости [6; 11].

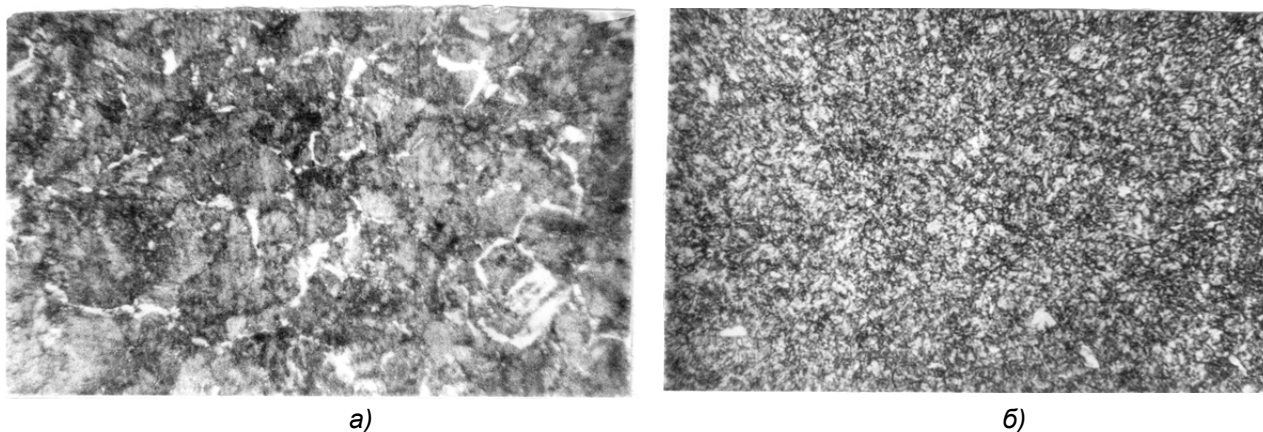
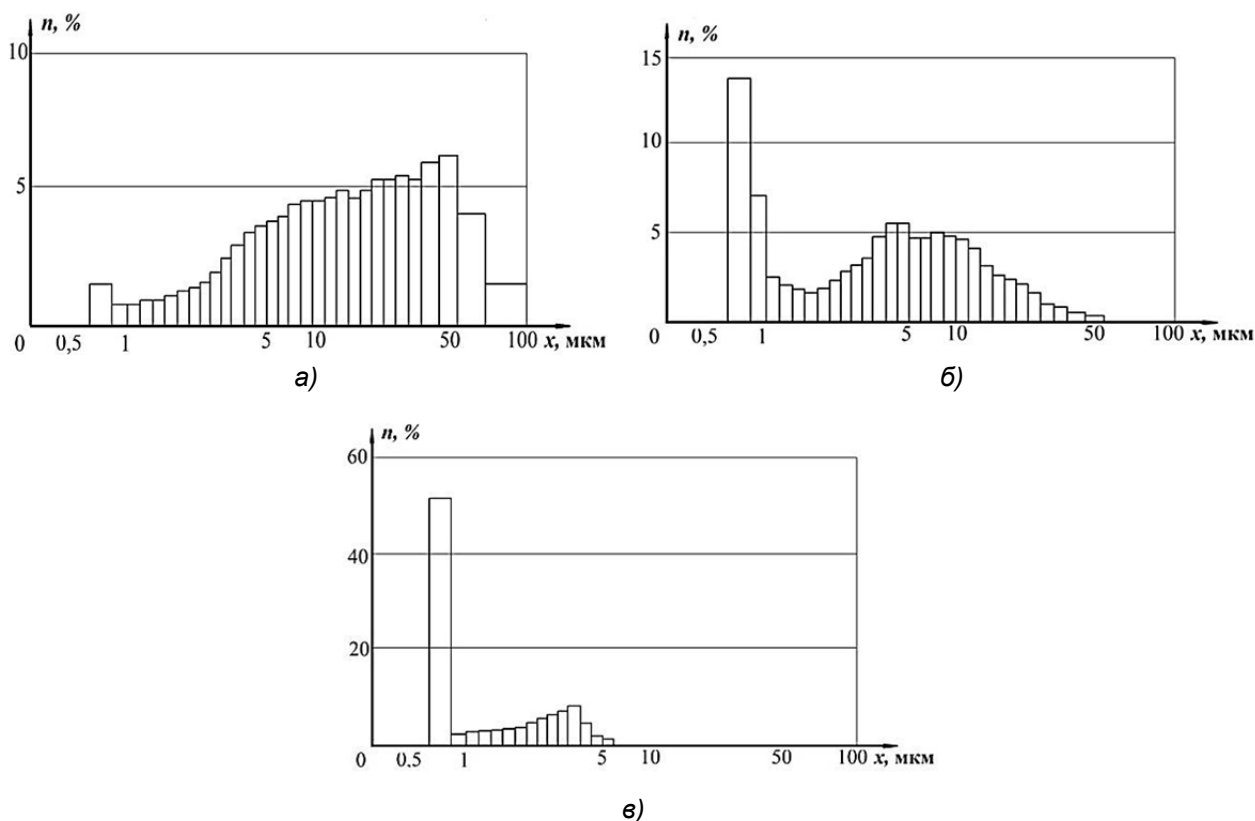


Рисунок 6. — Микроструктура пружинной стали  $\times 1\ 000$ :  
а — сталь 65Г; б — сталь 51ХФА



**Рисунок 7. — Кинетика размол дисульфида молибдена  
а — исходный продукт; б — время помола 2 ч; в — время помола 4 ч**

Пружинные мельницы обладают значительным потенциалом повышения эффективности работы. К их числу можно отнести управляемое движение обрабатываемого продукта при мокром способе помола, которое достаточно просто реализуется с помощью обжатия пружинного рабочего органа гибким эластичным корпусом, выполненным из огибающих его лент. Для сухого способа аналогичный результат достигается при использовании мелющей загрузки в виде мелких шариков, что даже при минимальном количестве позволило в 1,5 раза сократить время помола. Хорошие результаты достигаются также при использовании управляемого резонанса, наложения магнитного поля на пружинный рабочий орган в целях создания микросдвиговой деформации в рабочих зонах, а также рядом других мероприятий [4; 7].

Основным препятствием в развитии пружинных аппаратов является отсутствие централизованного производства рабочих органов к ним. Эта проблема представляется в большей степени организационной, при наличии инвестора и существующих в мире технологий она может быть успешно решена.

Сформулируем основные области применения и перспективы использования пружинных аппаратов. В силу своей универсальности и конструктивного многообразия рассматриваемое оборудование может быть использовано практически во всех отраслях народного хозяйства для комплексной переработки дисперсных материалов [1; 4; 12]. Область их рационального использования охватывает материалы исходной крупностью менее 5...8 мм, прочностью на сжатие до 200...250 МПа, твердостью до 6 единиц по шкале Мооса, средней абразивности. Такие материалы можно обрабатывать как по сухому, так и по мокрому способу, кроме диапазона критической влажности, вызывающей образование пробок в рабочих пространствах. Следует при этом оговориться, что для случая принудительной подачи материала в рабочие зоны это ограничение снимается. Производительность пружинных аппаратов определяется в первую очередь размерами и количеством установленных в них рабочих ор-

ганов. На этом основании производительность для одного рабочего органа составляет не более 3 т / ч для сухой обработки и не более 10 т / ч для мокрой. Дополнительная установка рабочих органов позволяет довести производительность оборудования до 50 т / ч и более.

Основные исследования и разработки по пружинным аппаратам проводятся на кафедре «Транспортные и технологические машины» Белорусско-Российского университета. Кроме мельниц, смесителей, механоактиваторов, диспергаторов и виброуплотнителей проводятся работы по созданию многоцелевых питателей-дозаторов с расширенными функциями, установок для процеживания шламов и шликеров, модулей к распылительным сушилкам и аппаратов для получения наноразмерных композиций [1; 3; 12].

**Заключение.** Выполнен комплексный анализ всех ранее выполненных работ и определены основные задачи дальнейшего развития оборудования с пружинными рабочими органами, которые сводятся к следующему:

- 1) разработка аналитических моделей гидродинамики в рабочем пространстве и обеспечение организованного движения обрабатываемого продукта в межвитковых пространствах;
- 2) использование метода интенсификации контактных взаимодействий между элементами рабочих органов путем использования дополнительной загрузки мелких мелющих тел;
- 3) оптимизация геометрических, кинематических и энергосиловых параметров пружинных рабочих органов;
- 4) проведение комплексных исследований для определения потенциальных возможностей пружинных аппаратов по переработке различных материалов и сред;
- 5) расширение исследований по использованию пружинных аппаратов для переработки продуктов органического происхождения;
- 6) разработка методов повышения износостойкости и повышения прочности при циклическом нагружении пружинных рабочих органов;
- 7) решение задач оптимального проектирования как отдельных пружинных аппаратов, так и технологических комплексов на их основе;
- 8) функционально-стоимостной анализ организации выпуска и производственной эксплуатации пружинных аппаратов.

#### Список цитируемых источников

1. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия : монография / Л. А. Сиваченко [и др.] ; под науч. ред. Л. А. Сиваченко. — Барановичи : БарГУ, 2020. — 359 с.
2. Герман, Х. Шнековые машины в технологии / Х. Герман. — Л. : Химия, 1975. — 227 с.
3. Глубинное виброуплотнение бетонных смесей с помощью устройств с пружинными излучателями колебаний / Г. М. Абдукаликова [и др.] // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2020. — С. 7—16.
4. Сиваченко, Л. А. Прогноз и пути развития пружинных технологических аппаратов / Л. А. Сиваченко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудования для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2020. — С. 310—317.
5. Технологические аппараты адаптивного действия / Л. А. Сиваченко [и др.]. — Минск : Издат. центр БГУ, 2008. — 375 с.
6. Сиваченко, Л. А. Создание винтовых пружинных аппаратов для помола и смешивания, исследование их рабочих процессов и разработка методов расчета основных параметров : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.09 / Л. А. Сиваченко. — М. : МГАХМ, 1995. — 47 с.
7. Сиваченко, Л. А. Теоретический анализ работы рабочих органов пружинных мельниц в условиях интенсивных колебаний / Л. А. Сиваченко, Д. М. Хононов // Вестн. Орл. гос. ун-та. Сер. «Естественные науки». — 2005. — № 7—8. — С. 82—87.
8. Основы расчётов на прочность при напряжениях переменных во времени / Р. К. Вафин ; под ред. С. Д. Пономарёва, В. А. Светлицкого. — М. : МВТУ, 1978. — 58 с.

9. *Когаев, В. П.* Расчёт деталей машин и конструкций на прочность и долговечность : справочник / В. П. Когаев, В. А. Махутов, А. П. Гузенков. — М. : Машиностроение, 1993. — 364 с.

10. *Сиваченко, Л. А.* Пружинная мельница для получения ультрадисперсных жидкотекучих композиций / Л. А. Сиваченко, И. М. Дыдышко // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : материалы Междунар. науч.-практ. конф. — Белгород : БГТУ, 2021. — С. 243—250.

11. Развитие техники и технологии сверхтонкого помола материалов / Л. А. Сиваченко [и др.] // Инженер-механик. — 2018. — № 4. — С. 6—11.

12. *Сиваченко, Л. А.* Многоцелевой пружинный питатель-дозатор / Л. А. Сиваченко, Д. А. Щукин // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : материалы Междунар. науч.-практ. конф. — Белгород : БГТУ, 2020. — С. 377—381.

Поступила в редакцию 13.10.2021.

УДК 621.926.32

**Л. Л. Сотник<sup>1</sup>; С. И. Русан<sup>1</sup>**, кандидат технических наук, доцент;**Л. А. Сиваченко<sup>2</sup>**, доктор технических наук, профессор<sup>1</sup>Учреждение образования «Барановичский государственный университет, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 803 45 28, Sotnikdin037@gmail.com<sup>2</sup>Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», ул. Грушевская, 32, 212003 Могилев, Республика Беларусь, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru

## АНАЛИЗ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВИБРОВАЛКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДВИЖЕНИЯ ВАЛКА

В статье представлены результаты аналитических исследований пропускной способности вибровалкового измельчителя с переменными параметрами движения эксцентрикового валка. Пропускная способность вибровалкового агрегата сравнивается с валковым агрегатом. Отличительной особенностью вибровалкового измельчителя является эксцентрично установленный валок. Проведен анализ влияния на производительность геометрических (величина эксцентриситета  $e$ ) и технологических (коэффициент соотношения скоростей валков  $k_v$  и частота вращения эксцентрикового вала  $n_{эв}$ ) параметров. Дана оценка влияния геометрических и технологических параметров на производительность вибровалкового агрегата с гармоническим законом движения валка.

**Ключевые слова:** вибровалковый измельчитель; производительность; измельчение материалов; эксцентриситет; зазор; валки.

Рис. 8. Библиогр.: 16 назв.

**L. L. Sotnik<sup>1</sup>; S. I. Rusan<sup>1</sup>**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor;**L. A. Sivachenko<sup>2</sup>**, Doctor of Technical Sciences, Professor<sup>1</sup> Educational institution "Baranovichi State University", 21 Voykova Str., 225406 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (29) 803 45 28, Sotnikdin037@gmail.com<sup>2</sup> Inter-State Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", 32 Grushevskaya Str., 212003 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru

## ANALYSIS OF THE THROUGHPUT OF A VIBRATING GRINDER WITH VARIABLE PARAMETERS OF THE ROLL MOVEMENT

The article presents the results of analytical studies of the throughput of a vibratory roll grinder with movement variable parameters of an eccentric roll. The throughput capacity of the vibrating roller unit is compared with the roller unit. A distinctive feature of the vibratory roll grinder is the eccentrically mounted roll. The analysis of the impact on the performance of geometric (the value of eccentricity  $e$ ) and technological (roll speeds ratio  $k_v$  and the rotation frequency of the eccentric shaft  $n_{эв}$ ) parameters has been carried out. An assessment of the influence of geometric and technological parameters on the performance of a vibratory roll unit with a harmonic law of roll motion is given.

**Key words:** vibratory roll grinder; productivity; material crushing; eccentricity; gap; rolls.

Fig. 8. Ref.: 16 titles.

**Введение.** Современная отечественная и мировая промышленность не стоит на месте, она ежегодно стремится перейти на более высокие уровни технологичности и производительности. Все это возможно лишь при совместном движении с развивающейся наукой и техникой.

На сегодня среди всего многообразия известных способов дезинтеграторной переработки материалов в дисперсное состояние в промышленности строительных материалов, химической и фармацевтической промышленности, наиболее распространенным и простым остается механическое измельчение.

Исходный материал разрушают и измельчают воздействием внешних сил, отличающихся локализацией, направлением и скоростью их приложения, что оказывает влияние на производительность этих агрегатов [1—4].

Оценка величины производительности вибровалкового измельчителя при внедрении в производственные линии имеет существенное значение. Величина производительности оказывает влияние на энергозатраты процесса измельчения различных материалов.

В валковых мельницах согласно [5—8] производительность зависит от физико-механических характеристик материала и геометрических параметров валков.

**Материалы и методы исследования.** На основе проведенного анализа классификаций, развития и совершенствования валковых мельниц разработана новая конструкция валковой мельницы с дополнительным вибрационным воздействием на измельчаемый материал. Сфера ее возможного применения определяется теми возможностями вибраций, которые известны сегодня [7; 9; 10].

Вибровалковый измельчитель относится к группе кинематических вибрационных машин, т. е. таких машин, у которых ведущее звено имеет вполне определенное абсолютное или относительное движение, зависящее только от геометрических размеров ведущего механизма.

Вибровалковый измельчитель (рисунок 1) состоит из рамы 1, на которой в соответствующих опорах посредством цапф вала 2 смонтирован ведущий валок 3 и эксцентриковый вал 4 эксцентрикового валка 5. Привод ведущего валка 3 осуществляется от электродвигателя через ременную передачу 6, а ведомого валка — от электродвигателя через ременную передачу 7. Вибрационное воздействие подается на эксцентриковый вал 4 при помощи электродвигателя через ременную передачу 8. На эксцентриковом валу 4 установлены противовесы 9 и 10 для уравнивания системы. Для загрузки и выгрузки материала предусмотрены устройства, выполненные в виде люков. Эксцентриковый вал 4 имеет эксцентриситет  $e$  относительно центральной оси эксцентрикового валка 5 [8; 11; 12].

Рабочий процесс вибровалкового измельчителя осуществляется следующим образом. Одновременно включаются электродвигатели и приводят во вращение соответствующие элементы конструкции, причем ведущий валок 3 и эксцентриковый валок 5 вращаются навстречу друг другу.

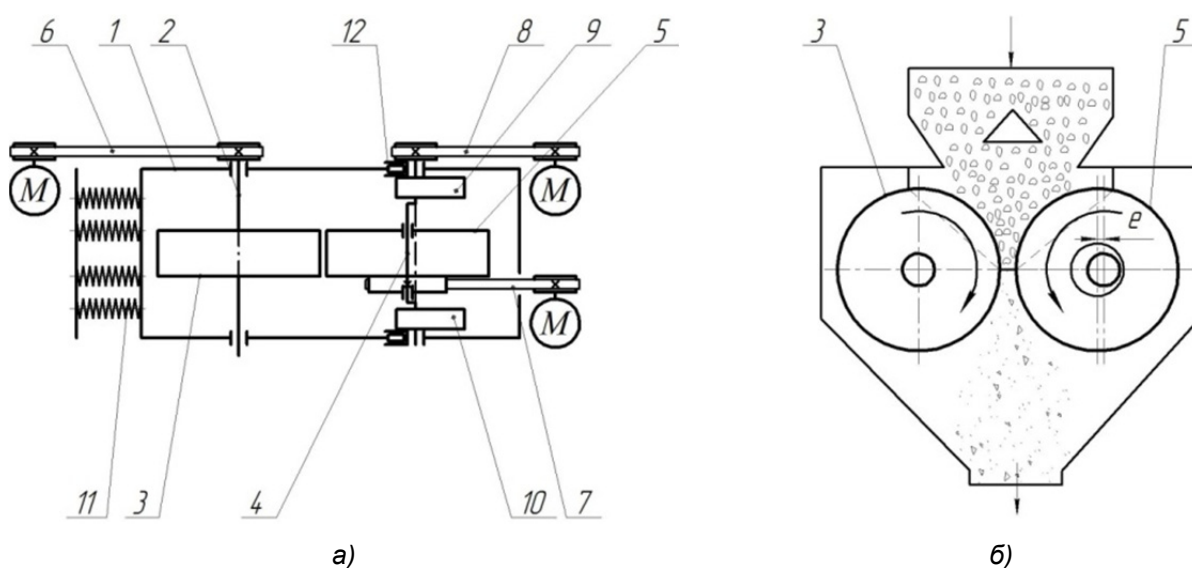


Рисунок 1. — Схема вибровалкового измельчителя: а — вид сверху; б — вид сбоку

При этом эксцентриковый вал 4 через опоры сообщает подвижному валку 5 круговые колебания с амплитудой  $2e$ . Через загрузочный люк в межвалковое пространство непрерывным потоком подается подлежащий обработке исходный материал и подвергается интенсивному разрушению путём воздействия на него сжимающего, сдвигового и вибрационного (ударного) усилий.

В процессе работы измельчителя ведущий валок 3 за счёт сил трения, возникающих в зоне контакта частиц материала с валком и их захвата внешней поверхностью ведущего валка 3 и реактивного момента, создаваемого силами трения эксцентрикового вала 4, приводит к вращению эксцентрикового валка 5 в направлении, противоположном вращению валка 3, что способствует захвату материала и его принудительному перемещению через межвалковое пространство. При помощи электродвигателя и ременной передачи 7 можно регулировать частоту вращения эксцентрикового валка 5, меняя тем самым интенсивность сдвигового воздействия на материал. При попадании недробимого материала в межвалковое пространство, ведущий валок 3 имеет возможность горизонтального смещения при помощи предохранительного устройства в виде системы пружин 11, упирающихся в раму 1. Обработанный таким образом материал удаляется из рабочей зоны агрегата через выгрузной люк.

Для изменения величины межвалкового пространства предусмотрены регулировочные устройства 12.

Вибрационные воздействия, реализуемые в вибровалковом измельчителе, обладают рядом достоинств по сравнению с постоянными воздействиями, используемыми в пресс-валковых измельчителях. Во-первых, это эффект облегчения преодоления сил трения. Этот эффект понимается как особое свойство вибраций уничтожать, хотя бы частично, силы трения, а также обеспечивает более равномерное распределение материала по длине валка. Во-вторых, это эффект выигрыша в силе, т. е. возможность преодоления сопротивления с меньшими усилиями при разрушении (деформации) исходного продукта и, следовательно, увеличение производительности измельчителя [13; 14].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Анализ пропускной способности с переменными параметрами движения валка. Для анализа производительности вибровалкового измельчителя рассмотрим ряд моделей движения валка.

В качестве модели для исследования рассматривается межвалковое пространство 1 прямоугольной формы размером  $B \times b_{\max}$ , находящийся в горизонтальной плоскости (рисунок 2, а).

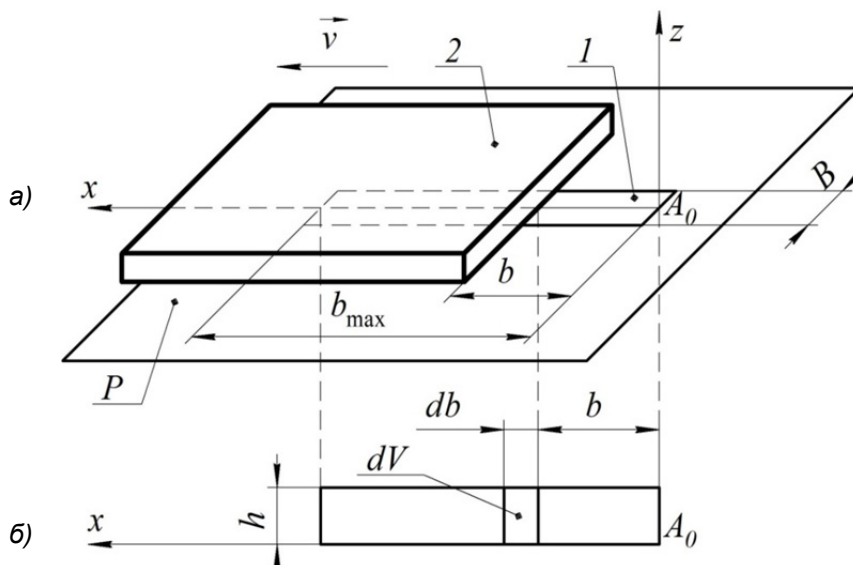


Рисунок 2. — Модель зазора и эпюра изменения объема в эталонном варианте



Пластина 2 (часть вала) может двигаться вдоль оси  $A_0x$  и частично или полностью закрывать или открывать зазор  $l$ . Движение пластины происходит одновременно с перемещением материала через открытую часть зазора. Считаем, что материал перемещается с постоянной скоростью  $v_1$  с бункера, находящегося над плоскостью  $P$ , вниз. Плоскость  $P$  является сечением вала по его оси.

Определим пропускную способность зазора  $l$  в зависимости от закона движения пластины 2. Рассматриваются три закона движения  $b = b(t)$ : равномерный, равнопеременный и гармонический. Для сравнительного анализа определяется и объем материала, перемещаемого через весь зазор  $B \times b_{\max}$  без пластины за единицу времени (эталонный вариант). Время (продолжительность) перемещения материала на любом элементарном участке  $\Delta b$  зазора обозначим как  $\tau$ . В общем случае  $\tau$  — величина переменная:  $\tau = \tau(t)$ , где  $t$  время движения пластины к рассматриваемому участку  $\Delta b$  зазора. На участках, где зазор открывается раньше, продолжительность перемещения  $\tau$  вещества через зазор больше.

Во всех указанных вариантах движения пластины время до полного открытия зазора, т. е. ее перемещение на расстояние  $b_{\max}$ , обозначим как  $t_1$ . Такое же время принимаем и для продолжительности перемещения материала через зазор в эталонном варианте. Для него эпюра, характеризующая изменение объема перемещаемого через зазор материала по ее длине  $b_{\max}$ , представленное на рисунке 2, б, в виде прямоугольника; его сторона  $h = v_1 t_1$  — высоты слоя материала, который переместился под плоскость  $P$ . Горизонтальное сечение слоя равно  $Bdb$ , его объем  $dV = Bdbh$ , объем всего просыпанного через зазор материала  $V = \int_0^l Bhdb$  или  $V = Bb_{\max} v_1 t_1$ .

Для сравнения пропускных способностей различных типов зазоров удобнее пользоваться характеристикой производительности  $Q$  ( $\text{м}^3 / \text{ч}$ ):

$$Q = \frac{V}{t_1}. \tag{1}$$

Таким образом, производительность агрегата с зазором без пластины равна  $Q = Bb_{\max} v_1$ , при условии, что скорость измеряется в  $\text{м} / \text{ч}$ , а размеры  $B$  и  $b$  — в метрах.

*Исследование зазора с подвижными пластинами.* На рисунке 3, а, пластина 2 движется со скоростью  $v$  влево. В момент времени  $t$  она находится на расстоянии  $b$  от начала  $A_0$  зазора  $l$ .

На рисунке 3, б, показана эпюра изменения объема материала, пересыпающегося под плоскость  $P$  (которая проецируется на рисунке в линию  $A_0x$ ). Ординаты эпюры пропорциональны длительности  $\tau$  пересыпания материала через соответствующий участок зазора.

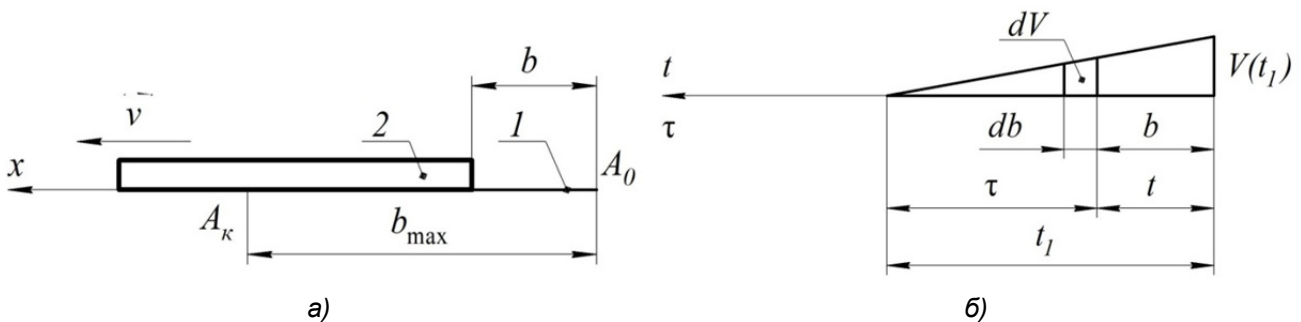


Рисунок 3. — Боковая проекция зазора и эпюр изменения объема в варианте с подвижной пластиной

Наибольший объем вещества  $V(t_1)$  успевает переместиться через участок  $\Delta b$ , прилегающий к точке  $A_0$  в момент времени  $t = t_1$  (когда открывается весь зазор). Элементарный объем материала, который перемещается через участок зазора  $db$  за время  $\tau$ ,

$$dV = Bdbv_1\tau, \quad (2)$$

где  $\tau = t_1 - t$  (см. рисунок 3, б).

*Пластина движется равномерно.* Скорость ее движения  $v = \text{const}$ , по закону движения  $b = vt$ ,  $db = vdt$ .

По выражению (2) находим  $dV = Bvv_1(t_1 - t)dt$ ;

$$V = \int_0^{t_1} Bvv_1(t_1 - t)dt = Bvv_1 \int_0^{t_1} (t_1 - t)dt = ct_1 \int_0^{t_1} dt - c \int_0^{t_1} tdt = c \left( t \Big|_0^{t_1} - \frac{1}{2}t^2 \Big|_0^{t_1} \right) = \frac{1}{2}ct_1^2,$$

где  $c = Bvv_1$ .

$$\text{Величина } t_1 = \frac{b_{\max}}{v}, \text{ тогда } V = \frac{1}{2}c \left( \frac{b_{\max}}{v} \right)^2.$$

$$\text{Окончательно получаем } V = \frac{1}{2}Bvv_1t_1.$$

Следовательно,

$$Q = \frac{1}{2}Bb_{\max}v_1. \quad (3)$$

*Пластина движется равноускоренно.* Ее ускорение  $a = \text{const}$ , скорость  $v = at$ . Поскольку  $v = db/dt$ , то  $db = vdt = atdt$ . Подставляем  $db$  в формулу (2):

$$dV = Bv_1at(t_1 - t)dt = c_1t(t_1 - t)dt,$$

где  $c_1 = Bv_1a$ .

Определим объем перемещаемого материала:

$$V = c \int_0^{t_1} t(t_1 - t)dt = c \left( t_1 \int_0^{t_1} tdt - \int_0^{t_1} t^2 dt \right) = c \left( t_1 \frac{1}{2}t^2 \Big|_0^{t_1} - \frac{1}{3}t^3 \Big|_0^{t_1} \right) = \frac{1}{6}ct_1^3 = \frac{1}{6}ct_1^2t_1.$$

$$\text{Зная, что } b_{\max} = \frac{at_1^2}{2}, \text{ определяем } t_1^2 = \frac{2b_{\max}}{a}.$$

Следовательно, объем перемещаемого материала

$$V = \frac{1}{6}c \left( \frac{2b_{\max}}{a} \right) t_1 = \frac{1}{3}Bb_{\max}v_1t_1,$$

откуда

$$Q = \frac{1}{3}Bb_{\max}v_1. \quad (4)$$

*Пластина движется по гармоническому закону.* Будем считать, что пластина приводится в движение при помощи кривошипно-шатунного механизма  $O_2MA$  (рисунок 4).

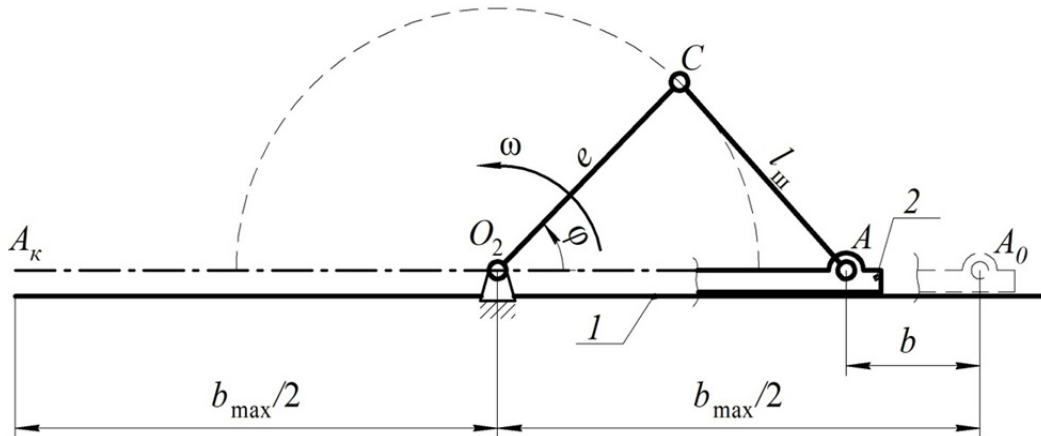


Рисунок 4. — Модель зазора с движением пластины по гармоническому закону

Ось вращения  $O_2$  кривошипа  $O_2M$  устанавливаем посередине длины зазора  $A_0O_2 = O_2A_K = b_{max} / 2$ . Принимаем длины кривошипа (эксцентриситет) и шатуна одинаковыми ( $l_{ш} = e$ ), а угловую скорость  $\omega$  кривошипа постоянной, тогда его угол поворота  $\phi = \omega t$ . Из рисунка 4 определяем  $b = 2e(1 - \cos \omega t)$ .

Следовательно,

$$\frac{db}{dt} = 2e\omega \sin \omega t .$$

Согласно выражению (2) получаем:

$$dV = B(2e\omega \sin \omega t) v_1 (t_1 - t) dt = c_2 (t_1 \sin \omega t - t \sin \omega t) dt ,$$

где  $c_2 = 2Be\omega v_1$ .

Для определения  $V$  необходимо определить интеграл от члена  $t \sin \omega t$ , находим  $V$  путем интегрирования по частям:

$$\int t \sin \omega t dt = \frac{\sin \omega t}{\omega^2} - \frac{t \cos \omega t}{\omega} .$$

Таким образом,

$$V = c_2 \left[ \left( \frac{t_1}{\omega} \right) (-\cos \omega t) \Big|_0^{t_1} - \left( \frac{\sin \omega t}{\omega^2} - \frac{t \cos \omega t}{\omega} \right) \Big|_0^{t_1} \right] .$$

Учитывая, что  $\omega t_1 = \pi$  и  $2e = b_{max} / 2$ , окончательно получаем:

$$V = \frac{1}{2} B v v_1 t_1 ,$$

где  $t_1 = \pi / \omega$ .

Отсюда определяем производительность:

$$Q = \frac{1}{2} B b_{max} v_1 . \quad (5)$$



Коэффициент уплотнения шихты

$$k_{\text{упл}} = \frac{H_{0 \text{ ср}}}{b_{\text{ср}}} = \frac{2R(1 - \cos \alpha_{\text{д ср}}) + b_{\text{ср}}}{b_{\text{ср}}} = \frac{D(1 - \cos \alpha_{\text{д ср}})}{b_{\text{ср}}} + 1. \quad (8)$$

С учетом приведенных выражений (7) и (8) выражение (6) принимает следующий вид:

$$Q = B b_{\text{ср}} \pi D n_{\text{вв}} k_v \mu k_{\text{пр}} \rho_0 k_{\text{виб}} k_e \left[ \frac{D(1 - \cos \alpha_{\text{д ср}})}{b_{\text{ср}}} + 1 \right]. \quad (9)$$

Анализ выражения (9) показывает, что производительность процесса измельчения вибровалкового измельчителя с эксцентрично установленным валком зависит от: конструктивных параметров измельчителя (геометрические размеры валков  $D$  и  $B$ , ширина зазора  $b$  и эксцентриситета  $e$ ); технологических показателей процесса (частоты вращения ведущего валка  $n_{\text{вв}}$ , частоты вращения эксцентрикового вала  $n_{\text{эв}}$ ); физико-механических характеристик материала (степени разрыхленности материала  $\mu$  и его насыпной плотности  $\rho_0$ ).

Качественной оценкой работы измельчителя является приведенная производительность, которая может быть определена по выведенной экспериментально формуле Розина—Рамллера [16]:

$$Q_{50} = Q \lg \left( 10^m \sqrt{\frac{E\%}{50}} \right),$$

где  $m$  — поправочный коэффициент, зависящий от свойств материала [16].

Определим теоретическую производительность вибровалкового измельчителя на основании следующих параметров:  $B = 0,05$  м,  $D = 0,24$  м,  $b_{\text{мин}} = 0,002$  м,  $e = 0,002$  м,  $n = 120$  мин<sup>-1</sup>,  $\rho_0 = 1400$  кг / м<sup>3</sup>,  $k_{\text{пр}} = 0,7$ ,  $\mu = 0,3$ :

$$Q = 0,05 \cdot 0,004 \cdot 3,14 \cdot 0,24 \cdot 120 \cdot 1 \cdot 0,3 \cdot 0,7 \cdot 1400 \cdot 1 \cdot \left[ \frac{0,24(1 - \cos 14)}{0,004} + 1 \right] = 14,9 \text{ кг / мин.}$$

Тогда приведенная производительность вибровалкового измельчителя по формуле Розина—Рамллера

$$Q_{50} = 14,9 \lg \left( 10^{0,9} \sqrt{\frac{60}{50}} \right) = 16,21 \text{ кг / мин, или } Q_{50} = 0,97 \text{ т / ч.}$$

Построим график изменения производительности  $Q$  в зависимости от величины коэффициента соотношения частот вращения валков  $k_v$  для различных материалов (рисунок 6).

Построим график изменения производительности в зависимости от частоты вращения эксцентрикового вала  $n_{\text{эв}}$  (рисунок 7).

Аналогичным образом построим график зависимости производительности  $Q$  от величины эксцентриситета  $e$  (рисунок 8).

Расчетные зависимости (см. рисунки 6—8) показывают, что все варьируемые параметры позволяют менять расчетную производительность вибровалкового измельчителя. Изменение коэффициента соотношения скоростей вращения незначительно снижает производительность (до 10 %), а частота колебаний эксцентрикового валка и величина эксцентриситета позволяют увеличить производительность до 20 %.

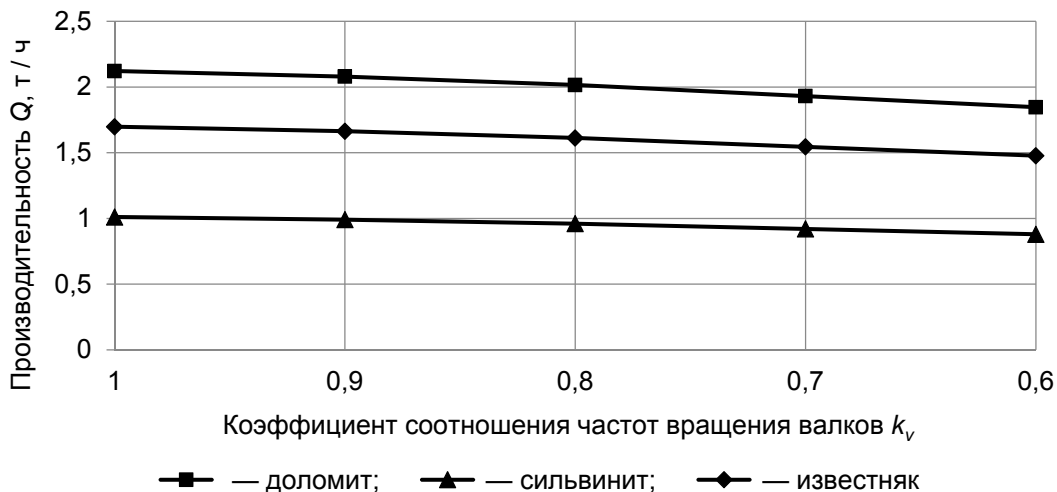


Рисунок 6. — Зависимость влияния величины коэффициента соотношения частот вращения валков  $k_v$  на производительность  $Q$

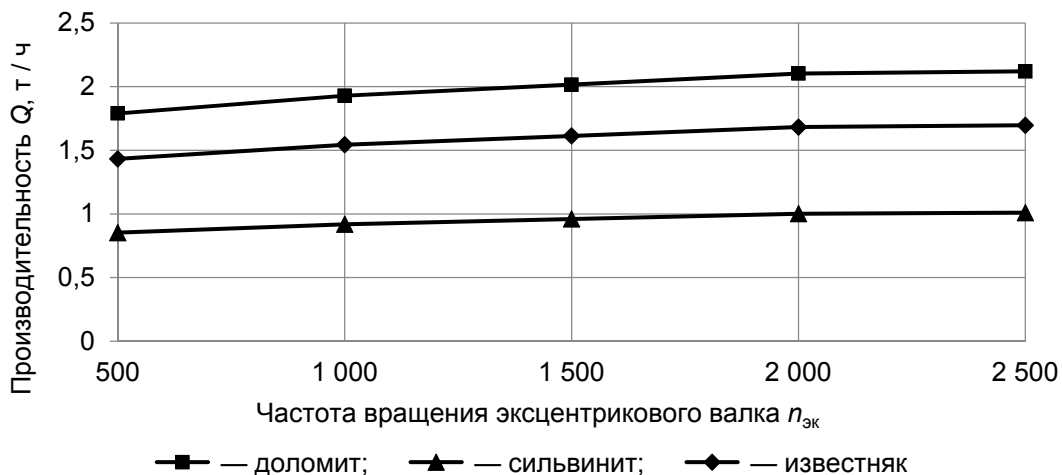


Рисунок 7. — Зависимость влияния частоты вращения эксцентрикового вала  $n_{эк}$  на производительность  $Q$

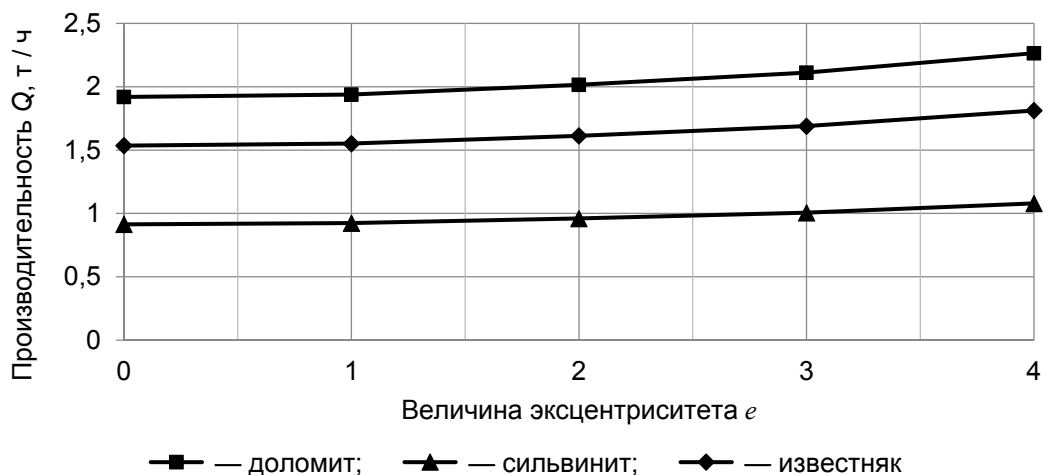


Рисунок 8. — Зависимость влияния величины эксцентриситета  $e$  на производительность  $Q$

**Заключение.** Представленные аналитические выражения и графические зависимости показывают целесообразность использования вибровалкового измельчителя с переменными параметрами движения валка, а также варьирование параметрами: скорости вращения валков, частоты вращения эксцентрикового вала и величины эксцентриситета [7; 11; 14].

Получены аналитические выражения для расчета производительности при измельчении материалов в вибровалковом измельчителе, а также для расчета приведенной производительности в зависимости от технологических и геометрических параметров измельчителя. Полученные зависимости показывают, что наличие эксцентрично установленного валка позволяет повысить производительность до 20 %, но это нуждается в практическом экспериментальном исследовании.

Проведенный анализ производительности в зависимости от варьируемых факторов показал актуальность исследований и необходимость проведения экспериментальных исследований в этом направлении.

#### Список цитируемых источников

1. Сиденко, П. Л. Измельчение в химической промышленности / П. Л. Сиденко. — М. : Химия, 1968. — 382 с.
2. Серго, Е. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых : учеб. для вузов / Е. Е. Серго. — М. : Недра, 1985. — 285 с.
3. Андреев, С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых : учеб. для вузов по специальности «Обогащение полезных ископаемых» / С. Е. Андреев, В. В. Зверевич, В. А. Перов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Недра, 1980. — 415 с.
4. Селективное измельчение минералов / В. И. Ревнивцев [и др.] — М. : Недра, 1988. — 286 с.
5. Поникоров, И. И. Расчет машин и аппаратов химических производств и нефтепереработки (примеры и задачи) : учеб. пособие / И. И. Поникоров, С. И. Поникоров, С. В. Рачковский. — М. : Альфа-М, 2008. — 720 с.
6. Романович, А. А. Основы расчета и проектирования пресс-валковых агрегатов для измельчения анизотропных материалов : монография / А. А. Романович, А. В. Колесников. — Белгород : БГТУ, 2011. — 165 с.
7. Сотник, Л. Л. К вопросу анализа производительности вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, Л. А. Сиваченко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород, 2018. — Вып. XVII. — С. 360—365.
8. Сотник, Л. Л. Методика расчета конструктивных и технологических параметров вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : межвуз. сб. ст. — Белгород, 2019. — Вып. XVIII. — С. 162—167.
9. Erdmann, P. Numerical simulation of dynamic soil compaction with vibratory compaction equipment / P. Erdmann, D. Adam // Geotechnics of Roads and Railways : proceedings XV Danube — European Conference on Geotechnical Engineering, 9—11 Sept. 2014, Vienna, Austria. — Vienna, 2014. — P. 243—248.
10. Tan, C. Design of a urea granulator with energy optimization / C. Tan // Proceedings of 3rd International conference on engineering and ICT, 4—5 April 2012, Melaka, Malaysia. — 2012. — Vol. 1. — P. 187—191.
11. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия : коллектив. моногр. / Л. А. Сиваченко [и др.] ; под науч. ред. Л. А. Сиваченко ; М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т. — Барановичи : БарГУ, 2020. — 359 с.
12. Вибровалковый измельчитель-активатор : пат. 186478 Рос. Федерации : B02C4/32 / В. С. Севостьянов [и др.] ; заявл. 20.08.2018 ; дата публ.: 22.01.2019.
13. Гончаревич, И. Ф. Вибротехника в горном производстве / И. Ф. Гончаревич. — М. : Недра, 1992. — 319 с.
14. Сотник, Л. Л. Анализ результатов исследований зависимости производительности от основных факторов вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2018. — Вып. 6. — С. 81—86.
15. Сотник, Л. Л. Изучение влияния технологических факторов на потребляемую мощность вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, Л. А. Сиваченко, И. А. Богданович // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. «Машиностроение». — 2018. — № 4. — С. 19—22.
16. Романович, А. А. Энергосберегающие агрегаты для измельчения материалов цементного производства с анизотропной текстурой : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.13 / А. А. Романович. — Белгород, 2014. — 398 л.

Поступила в редакцию 13.10.2021.

УДК 674.055:621.934:630.652

**В. В. Чаевский**<sup>1</sup>, кандидат физико-математических наук, доцент;**А. К. Кулешов**<sup>2</sup>, кандидат физико-математических наук;**П. В. Рудак**<sup>3</sup>, кандидат технических наук;**С. Барчик**<sup>4</sup>, доктор наук, профессор;**П. Коледа**<sup>4</sup>, кандидат технических наук, доцент<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, 220006 Минск, Республика Беларусь, chayeuski@belstu.by<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, пр-т Независимости, 4, 220030 Минск, Республика Беларусь<sup>3</sup>Общество с ограниченной ответственностью «БалансКонтакт», ул. Смоленская, 15, к. 303б, 220088 Минск, Республика Беларусь<sup>4</sup>Технический университет в Зволене, ул. Студенческая, 26, 96053 Зволен, Словацкая Республика

## ВЛИЯНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ЛЕЗВИЙ НОЖЕЙ НА РЕЖУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ФРЕЗЫ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ДРЕВЕСИНЫ

В статье исследованы параметры резания экспериментального инструмента при плоском фрезеровании древесины дуба. Экспериментальным инструментом являлась торцевая фреза со сменными ножами. Ножи были изготовлены из быстрорежущей стали HS 18-0-1-5 (ISO 4957:1999). Два фрезерных ножа были дополнительно обработаны различными ионно-плазменными покрытиями методом катодно-ионной бомбардировки. На поверхность ножа *B* было осаждено многослойное AlTiCrN-покрытие, ножа *C* — MoC-покрытие. Результаты измерений показали, что мощность резания для торцевого фрезерования увеличивается с увеличением длины фрезерования для всех трех исследуемых ножей фрезы. Максимальная мощность резания была измерена для фрезы с ножом *C*. Установлено, что параметр шероховатости *Ra* поверхности древесины практически не изменяется для ножей *B* и *C* во всем диапазоне применяемых скоростей подачи, а также незначительно уменьшается (до 5 мкм) при увеличении длины фрезерования и практически не зависит от обработки лезвий ножей фрезы.

**Ключевые слова:** ножи фрезы; древесина; мощность резания; шероховатость; покрытия; метод КИБ.

Рис. 5. Табл. 2. Библиогр.: 14 назв.

**V. V. Chayeuski**<sup>1</sup>, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor;

**A. K. Kuleshov**<sup>2</sup>, PhD in Physical and Mathematical Sciences;

**P. V. Rudak**<sup>3</sup>, PhD in Engineering (Technical) Sciences; **Š. Barčík**<sup>4</sup>, PhD, Professor;

**P. Koleda**<sup>4</sup>, PhD, Doctor, Engineer

<sup>1</sup>Belarusian State Technological University, 13a, Sverdlova Str.,

220006 Minsk, the Republic of Belarus, chayeuski@belstu.by

<sup>2</sup>Belarusian State University, 4, Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, the Republic of Belarus

<sup>3</sup>Limited Liability Company “BalansContact”, room 303b, 15, Smolenskaya Str., 220088 Minsk, the Republic of Belarus

<sup>4</sup>Technical University in Zvolen, 26 Študentská Str., Zvolen, 96053 Slovak Republic

## THE EFFECT OF ION-PLASMA TREATMENT OF THE BLADES ON THE CUTTING ABILITY OF THE MILLING CUTTER DURING WOOD MILLING

The article studies the cutting parameters of the experimental tool with a flat milling of oak wood. The experimental tool was an end mill with interchangeable knives. The knives were made of high speed steel HS 18-0-1-5 (ISO 4957:1999). Two milling knives were additionally treated with different ion-plasma coatings by Arc-PVD method. Multilayer AlTiCrN coating was deposited on the surface of the knife *B*, MoC coating was deposited on the surface of the knife *C*. The results of measurements have shown that the cutting power for end milling is increased with the increase in the length of milling for all three investigated knives of cutter. Maximum cutting power was achieved with knife *C*. It was found out that the roughness parameter *Ra* of the wood surface practically does not change for knives *B* and *C* in the entire range of applied feed rates, and also slightly decreases (up to 5 μm) with an increase in the milling length and does not depend on the processing of the cutter knives edges.

**Key words:** knives of mill; wood; cutting power; roughness; coatings; Arc-PVD method.

Fig. 5. Table 2. Ref.: 14 titles.



**Введение.** Фрезы разнообразных конструкций являются основным признанным в мировой практике инструментом [1; 2]. Отличительной чертой этого инструмента считается широкое разнообразие размеров, профилей, типов, форм и сфер применения. Фрезерный инструмент, работая в условиях статических и динамических нагрузок, повышенных температур, что вызывает повышенный износ режущих элементов инструмента, обладает высокими эксплуатационными характеристиками и в полной мере обеспечивает возрастающие требования к точности и качеству обработки в условиях высокопроизводительного резания. Обработка материалов методом фрезерования является одной из наиболее распространенных технологических операций в деревоперерабатывающей промышленности и машиностроении.

Современное развитие технологии деревообработки требует применения износостойкого материала инструмента, выдерживающего большие динамические и вибрационные нагрузки в связи с использованием высоких скоростей резания. При использовании в качестве материала инструмента быстрорежущих сталей большое значение приобретает их теплостойкость.

Известно, что твердость материала лезвия ножа инструмента имеет важное значение для сохранения остроты режущей кромки лезвия. С другой стороны, кромка лезвия ножа не должна испытывать хрупкий излом или скалывание в процессе работы [3]. Поэтому для создания лучшей комбинации указанных двух характеристик применяют различные виды обработки материала лезвия (термообработка, шлифовка и т. п.) или ее поверхности (метод конденсации из газо-плазменной фазы с катодно-ионной бомбардировкой (далее — КИБ), магнитно-импульсная обработка и др.). Установлено, что одним из наиболее эффективных способов модификации поверхности стальных и твердосплавных лезвий ножей инструментов является метод КИБ, с помощью которого сформированные ионно-плазменные покрытия на базе нитридов тугоплавких металлов (Ti, Mo, Zr, Cr и др.) существенно увеличивают период стойкости инструмента [4; 5].

Кроме того, кинематические параметры резания существенно влияют на период стойкости лезвия ножа. При оптимальном подборе кинематических параметров резания увеличивается период стойкости ножа [6]. Шероховатость поверхности как одно из важнейших свойств конечных изделий из дерева во многом зависит от особенностей структуры древесины, направления волокон древесины и характеристик режущего инструмента [7].

Поэтому целью работы было исследование влияния КИБ обработки ножей торцевой фрезы на ее режущую способность.

**Материалы и методы исследования.** Для целей эксперимента были использованы образцы черенков дуба (*Quercus robur* L.) со средним возрастом 95 лет. Пиломатериалы толщиной 30 мм были получены в Техническом университете (ТУ) в Зволене (Словацкая Республика). Пиломатериал был просушен в печи до влажности 8 %. После сушки пиломатериал был разрезан на заготовки. Конечные размеры образцов: толщина — 25 мм, ширина — 100 мм, длина — 750 мм.

Плоское фрезерование образцов проводилось на деревообрабатывающем вертикальном фрезерном станке ZDS-2 производства Liptovské Strojárne (Словацкая Республика). Экспериментальные измерения мощности резания и шероховатости проводились на оборудовании, расположенном в опытно-конструкторских мастерских и лабораториях ТУ в Зволене.

В экспериментальных измерениях в качестве инструмента использовалась фрезерная головка производства Staton (Словацкая Республика), в которой устанавливалось два ножа (рисунок 1, а). Один нож был зажат только для динамической балансировки инструмента и не менялся во время экспериментальных измерений. Исследуемые ножи зажимались так, чтобы диаметр режущей окружности фрезерной головки  $D = 125$  мм. Фрезерные ножи (см. рисунок 1, б) были изготовлены из инструментальной высоколегированной Cr-V-Mo-стали HS 18-0-2-5 (ISO 4957:2018) и отшлифованы. Они поочередно зажимались на фрезерной головке.

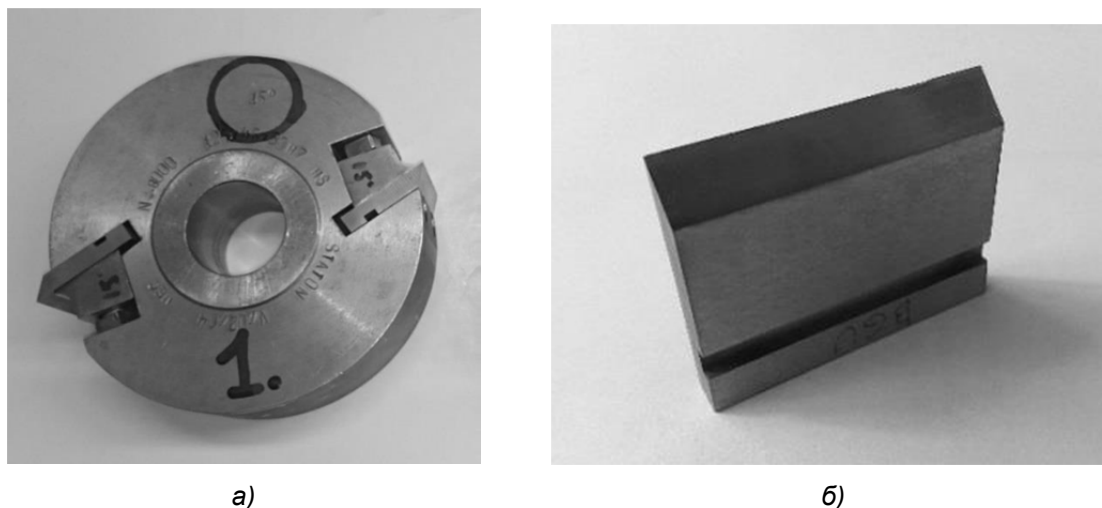


Рисунок 1. — Фрезерная головка (передний угол — 15°) (а) и сменный нож фрезы (б)

Фрезерные ножи *B* и *C* были дополнительно обработаны с помощью метода КИБ, в то время как нож *A* (контрольный) не подвергался дополнительной обработке поверхности. Процесс нанесения покрытия на нож *B* проводился в лаборатории государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси». Нанесение покрытия на нож *C* осуществлялось в лаборатории кафедры физики твердого тела Белорусского государственного университета совместно с кафедрой физики учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Твердость лезвий всех ножей *A*, *B* и *C* была измерена в ТУ в Зволене с помощью твердомера Škoda RB1 (с алмазным конусом 120°). Твердость лезвия ножа *A* составила 64 HRC. Характеристики покрытий ножей приведены в таблице 1. Технические и технологические параметры процесса фрезерования приведены в таблице 2.

Т а б л и ц а 1. — Характеристики покрытий ножей *B* и *C*

Показатель	Нож <i>B</i>	Нож <i>C</i>
Тип покрытия	AlTiCrN	MoC
Толщина покрытия	1...4 μm	1 μm
Температура осаждения	450...500 °C	600 °C
Средняя твердость покрытия	62 HRC	57 HRC

Т а б л и ц а 2. — Технические и технологические параметры процесса фрезерования

Параметр		Значение
Геометрия ножа, °	Угол задней грани $\gamma$	15
	Угол заточки лезвия $\beta$	45
	Угол клиренса $\alpha$	30
	Угол резания $\delta$	75
Скорость вращения $n$ фрезы, об. / мин		3 000, 4 000, 5 000
Скорость подачи $V_F$ , м / мин		6, 8, 10, 12, 14
Глубина резания $a_e$ , мм		1, 2

Измерение мощности резания проводилось с помощью прибора, изготовленного на кафедре технологии производства и автоматизации ТУ в Зволене. Устройство состояло из преобразователя частоты, который регулировал скорость трехфазного асинхронного двигателя [8]. Другой частью устройства был синусоидальный фильтр, который сглаживал импульсное напряжение от инвертора таким образом, чтобы приблизиться к идеальной синусоидальной фазе со сдвигом фазы  $\varphi = 120^\circ$ . Преобразователь частоты измерял активную потребляемую мощность двигателя без потерь (мощность холостого хода)  $P_{c0}$  и оценивал общую мощность двигателя  $P_c$  по току  $I_c$ , напряжению  $U_c$  и КПД двигателя. Мощность резания  $P$  вычислялась по формуле

$$P = P_c - P_{c0}, \quad (1)$$

где  $P_c = I_c U_c \cos\varphi$ .

Для определения качества шероховатости поверхности был использован бесконтактный лазерный профилометр (LPM-4), работающий по оптическому методу [9]. В этом методе лазерное излучение (лазерный диод) проецируется под углом  $45^\circ$  к измеряемой поверхности и затем сканируется с помощью ЖК-камеры (Marlin F131B). Лазерный луч создает след света на контролируемой поверхности, который сканируется и после ЖК-камеры преобразуется в двоичную форму изображения.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Установлено, что скорость подачи  $V_F$  и состав покрытия ножа влияют на мощность резания  $P$  фрезы. На рисунке 2 показан анализ изменения мощности резания в зависимости от скорости подачи.

Для каждого образца продемонстрирована зависимость снижения мощности резания от снижения скорости подачи в интервале значений скорости подачи  $V_F = 6 \dots 11$  м / мин, особенно при малых значениях скорости подачи ( $V_F = 6 \dots 8$  м / мин). Это происходит, потому что уменьшение скорости подачи уменьшает количество материала (стружки древесины), удаляемого за один раз.

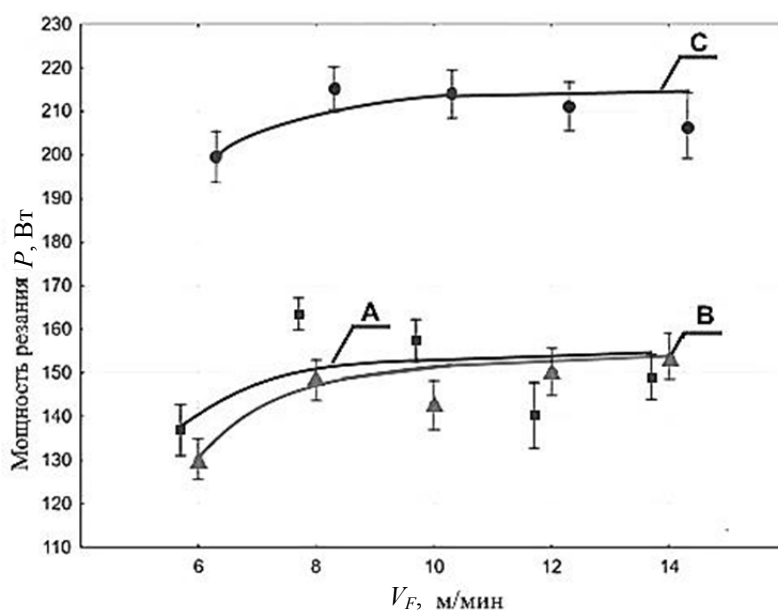


Рисунок 2. — Влияние скорости подачи на мощность резания фрезы с исследуемыми ножами ( $n = 5\,000$  об. / мин;  $a_e = 1$  мм; длина фрезерования  $L = 11,25 \dots 270,00$  м)

В результате сила резания и, следовательно, мощность резания уменьшаются, так как мощность резания зависит от силы резания [10]. При значениях скорости подачи  $V_F = 9 \dots 11$  м / мин на рисунке 2 наблюдается увеличение значения мощности резания  $P$  фрезы (в среднем в 1,1...1,2 раза больше, чем при значениях скорости подачи  $V_F = 6 \dots 8$  м / мин).

Данные результаты подтверждают полученный на основании исследований [11] вывод о том, что с увеличением средней толщины стружки в процессе фрезерования древесины кромки инструмента изнашиваются более интенсивно, так как с увеличением толщины стружки увеличивается сила трения и контактный путь скольжения стружки (длина контакта) по задней поверхности инструмента. Рисунок 2 также показывает, что при значениях скорости подачи более 11 м / мин мощность резания практически не меняется для всех образцов. Это объясняется зависимостью мощности резания от износа кромки лезвия ножа фрезы [12] и, вероятно, наличием монотонной фазы износа (без крошения кромок лезвий ножей) для всех исследуемых ножей фрезы при значениях скорости подачи более 11 м / мин.

На рисунке 2 можно наблюдать, что полученные значения мощности резания для фрезы с необработанным ножом и с ножом с AlTiCrN-покрытием практически не отличаются друг от друга. Кроме того, значения мощности резания для фрезы с ножом С (с MoC-покрытием) были практически на 40 % выше, чем для фрезы с необработанным ножом А и с ножом В (с AlTiCrN-покрытием), что указывает на повышенное потребление энергии для фрезы с ножом С.

Как показано на рисунке 3, глубина резания  $a_e$ , а также скорость подачи  $V_F$  и длина фрезерования  $L$  влияют на значение мощности резания фрезы  $P$  в ходе эксперимента для фрезы со всеми исследованными ножами.

На рисунке 3 а, б, видно, что с увеличением скорости вращения шпинделя значение мощности резания увеличивается. Для всех скоростей вращения фрезы ( $n = 3\ 000$  об. / мин; 4 000 об. / мин; 5 000 об. / мин) значение мощности резания на глубине резания  $a_e = 2$  мм (рисунок 3, б) практически в 2 раза больше, чем на глубине резания  $a_e = 1$  мм (рисунок 3, а).

Качество поверхности обработанного образца оценивается параметрами шероховатости поверхности ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $R_{max}$  и др.). Выбранный параметр  $Ra$  определяет или накладывает дополнительные требования на обработку поверхности древесины для достижения желаемого значения шероховатости поверхности.

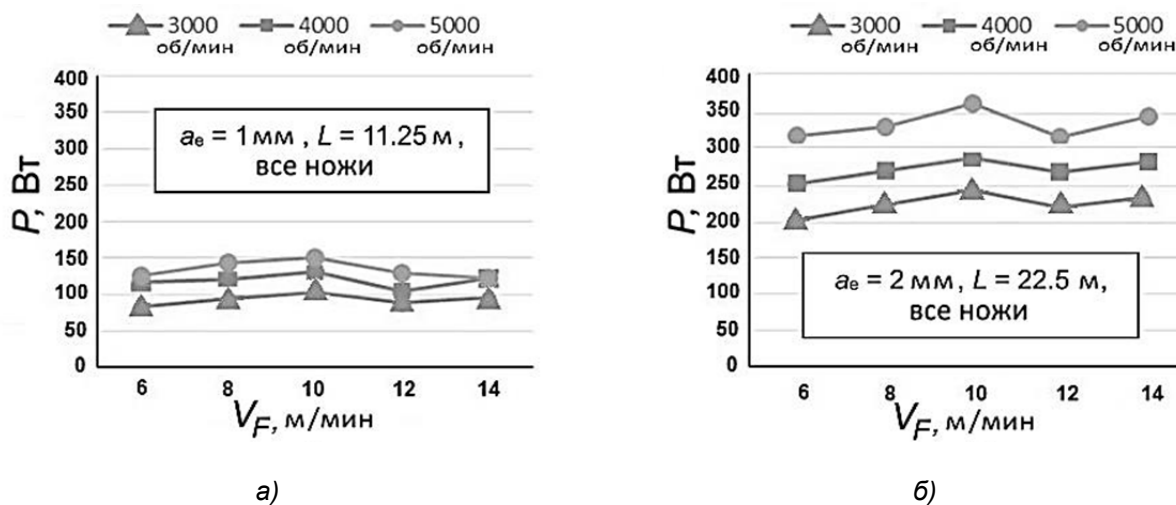


Рисунок 3. — Влияние глубины резания  $a_e$  и скорости подачи  $V_F$  на значение мощности резания фрезы  $P$

На рисунке 4 показаны зависимости среднеарифметических значений параметра шероховатости поверхности  $Ra$  обработанных поверхностей фрезерованных образцов древесины дуба от скорости подачи для всех исследованных ножей фрезы. На основании анализа показанной на рисунке 4 зависимости для всех исследованных ножей при параметрах фрезерования  $n = 5\,000$  об./мин,  $a_e = 1$  мм, длине фрезерования  $L = 11,25 \dots 270,00$  м можно сделать вывод, что в результате нанесения покрытий  $B$  и  $C$  на лезвия ножей фрезы шероховатость поверхности  $Ra$  фрезерованных образцов древесины практически не изменилась, но увеличилась в среднем на  $1,5$  мкм на образцах древесины дуба не модифицированной фрезой во всем диапазоне применяемых скоростей подачи  $V_F$ .

Таким образом, ионно-плазменная обработка лезвий ножей фрезы, увеличивая их износостойкость, способствует также сохранению значений параметра шероховатости поверхности  $Ra$  древесины как критерия качества.

Проведенные исследования [13] также показали незначительное изменение параметра шероховатости поверхности  $Ra$  в зависимости от скорости подачи ( $4,5$ ;  $9$ ;  $13,5$  и  $18$  м/мин) при глубине резания  $1$  мм при плоском фрезеровании образцов древесины бука (*Fagus sylvatica* L.).

На рисунке 5 показаны средние арифметические значения параметра шероховатости поверхности  $Ra$  фрезерованных образцов древесины в зависимости от длины фрезерования  $L$  для всех исследованных ножей фрезы при параметрах фрезерования  $n = 5\,000$  об./мин,  $a_e = 1$  мм,  $V_F = 6, 8, 10, 12, 14$  м/мин.

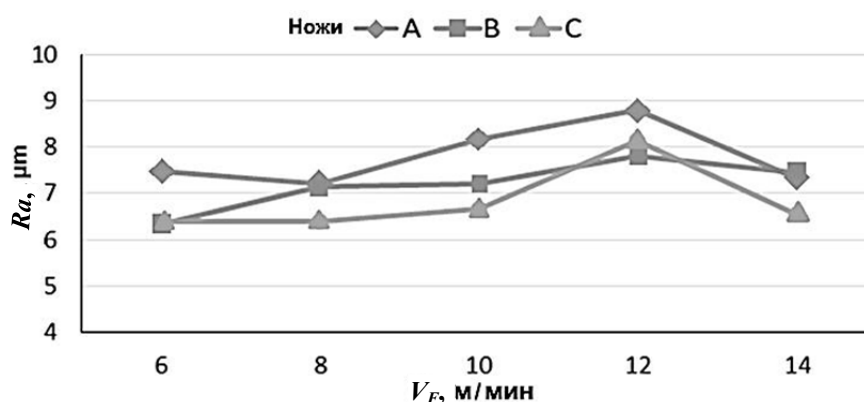


Рисунок 4. — Влияние скорости подачи  $V_F$  на значение шероховатости  $Ra$  образцов древесины (параметры фрезерования:  $n = 5\,000$  об./мин,  $a_e = 1$  мм, длина фрезерования  $L = 11,25 \dots 270,00$  м)

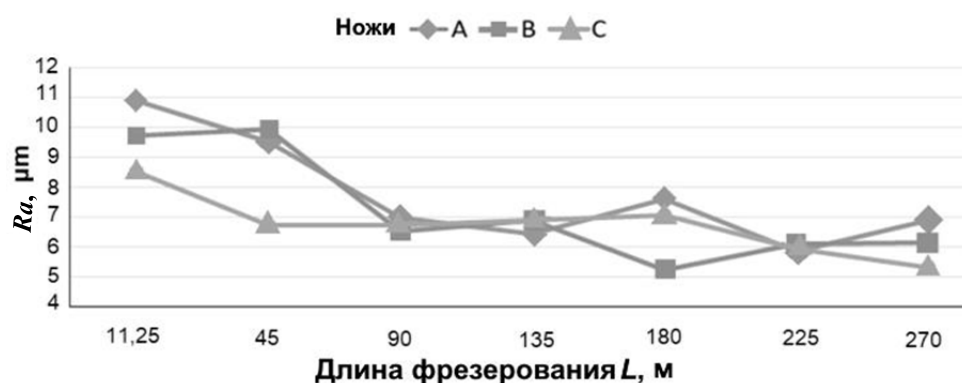


Рисунок 5. — Влияние длины фрезерования на значение шероховатости  $Ra$  образцов древесины (параметры фрезерования:  $n = 5\,000$  об./мин,  $a_e = 1$  мм,  $V_F = 6, 8, 10, 12, 14$  м/мин)

Видно, что значение параметра контролируемой шероховатости  $Ra$  поверхности образцов древесины имеет тенденцию к снижению в небольшом диапазоне ( $\approx 3 \dots 5$  мкм) при увеличении длины фрезерования от 11,25 до 270,00 м и не зависит от нанесенных покрытий на лезвия ножей фрезы.

У большинства проанализированных немодифицированных стальных (HS 6-5-2) ножей и ножей с ионно-плазменным CrCN/CrN-покрытием фрезы зафиксировано снижение среднего значения параметра шероховатости на поверхностях ножей после обработки древесины сосны [14]. Уменьшение значения параметра шероховатости в основном определялось абразивным износом лезвий ножей инструмента.

**Заключение.** Результаты исследований показали, что мощность резания для торцевого фрезерования увеличивается с увеличением длины фрезерования для всех трех исследуемых ножей фрезы. Максимальная мощность резания была измерена для фрезы с ножом *C*. Установлено, что параметр шероховатости  $Ra$  поверхности древесины практически не изменяется для ножей *B* и *C* во всем диапазоне применяемых скоростей подачи, а также незначительно уменьшается (до 5 мкм) при увеличении длины фрезерования и практически не зависит от обработки лезвий ножей фрезы. Ионно-плазменная обработка лезвий ножей фрезы, увеличивая их износостойкость, способствует сохранению значений параметра шероховатости поверхности  $Ra$  древесины дуба как критерия качества.

#### Список цитируемых источников

1. ЛЕКСИКОН Лейтц : каталог фирмы Leitz. — 4-е изд. — М. : Лейтц Инструменты, 2011. — 838 с.
2. New Products catalog : каталог компании Iscar Ltd. — Metric Version 3. — 2016. — 301 p.
3. Янюшкин, А. С. Качественные показатели поверхностей и состояние режущей кромки твёрдосплавного дереворежущего инструмента, заточенного различными методами затачивания / А. С. Янюшкин, Д. В. Лобанов, А. М. Кузнецов // Тр. Брат. гос. техн. ун-та. — Братск : БрГУ, 2005. — Т. 2. — С. 153—156.
4. Влияние ZrN, Mo-N покрытий, сульфацианирования на износ ножей дереворежущего инструмента / А. К. Кулешов [и др.] // Трение и износ. — 2014. — Т. 35, № 3. — С. 276—286.
5. Эффективность применения TiN-, ZrN-, Ti-Zr-N- и Ti-покрытий на твердосплавных резцах при обработке ламинированных древесно-стружечных плит концевыми фрезами / А. А. Гришкевич [и др.] // Тр. БГТУ. Сер. 6 : Физ.-мат. науки и информатика. — 2008. — Вып. XVI. — С. 52—54.
6. Исследование физико-механических свойств ножей с ZrN-покрытиями для агрегатной обработки древесины сосны и ели / А. А. Гришкевич [и др.] // Тр. БГТУ. Сер. 6 : Физ.-мат. науки и информатика. — 2013. — С. 63—65.
7. Keturakis, G. Tool Wear Evolution and Surface Formation in Milling Various Wood Species / G. Keturakis, R. Bendikine, A. Baltrusaitis // BioResources. — 2017. — Vol. 12, № 4. — P. 7943—7954.
8. Influence of Cutting Wedge Treatment on Cutting Power, Machined Surface Quality, and Cutting Edge Wear When Plane Milling Oak Wood / P. Koled [et al.] // BioResources. — 2019. — Vol. 14, № 4. — P. 9271—9286.
9. Effects of technical and technological parameters on the surface quality when milling thermally modified European oak wood / M. Korčok [et al.] // BioResources. — 2018. — Vol. 13, № 4. — P. 8569—8577.
10. Cutting power during lengthwise milling of thermally modified oak wood / P. Koleda [et al.] // Wood Research. — 2019. — № 64 (3). — P. 537—548.
11. Effect of Technological Parameters on Energetic Efficiency When Planar Milling Heat-treated Oak Wood / P. Koleda [et al.] // BioResources. — 2021. — Vol. 16, № 1. — P. 515—528.
12. Bendikine, R. The influence of technical characteristics of wood milling tools on its wear performance / R. Bendikine, G. Keturakis // J. of Wood Science. — 2017. — Vol. 63. — P. 606—614.
13. Milling of heat-treated beech wood (*Fagus sylvatica* L.) and analysis of surface quality / M. Ispas [et al.] // BioResources. — 2016. — Vol. 11, № 4. — Pp. 9095—9111.
14. Experimental Studies on Durability of PVD-Based CrCN/CrN-Coated Cutting Blade of Planer Knives Used in the Pine Wood Planing Process / K. Nadolny [et al.] // Materials. — 2020. — Vol. 13, iss. 10. — P. 2398—2420.

УДК 631.312.021.4:631.512

**И. В. Дубень**, кандидат технических наук, доцент  
Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,  
225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 824 26 49, duben\_i\_v@mail.ru

### **АГРОТЕХНИЧЕСКАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ ПЛУЖНЫХ КОРПУСОВ С УГЛОСНИМАМИ**

Проведены полевые исследования работы плужного корпуса ПЛП-01 с углоснимом, установленным в верхней части отвала, а также корпуса без углоснима. Оценивались агротехнические показатели работы — крошение почвы, глыбистость и заделку растительных остатков, а также тяговое сопротивление корпуса. Установлено, что углосним интенсивно воздействует на почвенный пласт, при этом показатели крошения почвы и заделки растительных остатков значительно повышаются. Однако применение углоснимов приводит к увеличению тягового сопротивления при вспашке на 9,5...18,4 %.

**Ключевые слова:** отвальная вспашка; плуг; углосним; тяговое сопротивление; крошение почвы; глыбистость; заделка растительных остатков.

Рис. 1. Табл. 3. Библиогр.: 12 назв.

**I. V. Duben**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor  
Educational institution “Baranovichi State University”, 21 Voikova Str., 225401 Baranovichi,  
the Republic of Belarus, +375 (29) 824 26 49, duben\_i\_v@mail.ru

### **AGROTECHNICAL AND ENERGY ASSESSMENT OF THE WORK OF PLOUGH BODIES WITH TRASHBOARD**

Field studies of the PLP-01 plow body operation with a trashboard installed in the upper part of the mouldboard, as well as the body without a trashboard were carried out. The agrotechnical performance indicators - soil crumbling, clumping and incorporation of plant residues, as well as the traction resistance of the hull were evaluated. It has been established that the trashboard action intensively affects the soil formation, while the indicators of soil crumbling and seeding of plant residues significantly increase. However, the use of trashboard leads to the increase in the traction resistance during plowing on 9.5...18.4 %.

**Key words:** moldboard plowing; plow; trashboard; traction resistance; soil crumbling; clumping; incorporation of plant residues.

Fig. 1. Table 3. Ref.: 12 titles.

**Введение.** Отвальная вспашка в условиях нашей страны имеет неоспоримые преимущества перед всеми вариантами минимальной обработки, в том числе глубокая заделка органических удобрений и семян сорняков, откуда их ростки не могут выйти на поверхность почвы. Таким образом, плуг является «санитаром полей» в борьбе с сорняками без применения гербицидов, однако для этого нужен полный оборот пластов.

В настоящее время в Беларуси плужные корпуса с лемешно-отвальной поверхностью культурного типа в производственных условиях практически не используются, вместо культур-

ной вспашки в подавляющем большинстве случаев применяется вспашка корпусами полувинтового типа без предплужников (взмет зяби). Это вызвано желанием избежать загромождения межкорпусного пространства плуга растительными остатками, а также уменьшить тяговое сопротивление орудия. Однако с агротехнической точки зрения по полноте оборота пластов, заделке растительных остатков, удобрений и семян сорняков взмет зяби не выдерживает критики [1].

Технические решения для улучшения оборота почвенных пластов следующие:

- 1) применение предплужников, которыми в качестве опции оснащаются плуги ряда известных западных производителей;
- 2) углоснимы, первоначально предназначенные как замена предплужникам для вспашки почв, засоренных камнями;
- 3) применение других дополнительных рабочих органов, улучшающих оборот пласта после схода его с отвала.

На полях с обильными пожнивными остатками, например, после кукурузы и подсолнечника, лучше работать плугом с увеличенными отвалами. Также при вспашке по таким полям рекомендуется установка предплужников. В этом случае растительные остатки лучше заделываются в почву. Однако в нашей стране предплужники находят весьма ограниченное применение главным образом потому, что они не производятся предприятиями сельскохозяйственного машиностроения [2].

На плугах, работающих по «залежам», наилучшим вариантом является применение предплужников. Также возможна дополнительная установка углоснимов, которые позволяют лучше заделывать растительные остатки на дно борозды [3].

Углоснимы выполняют ту же роль, что и предплужники, но срезают только угол почвенного пласта. По стоимости и металлоёмкости углоснимы выигрывают по сравнению с предплужником. Они крепятся непосредственно к отвалам корпусов, что даёт существенное преимущество: плуг с углоснимами меньше забивается, так как пространство между корпусами ничем не закрыто.

Положение углоснима относительно отвала корпуса регулируется в зависимости от глубины пахоты. Правильно отрегулированный углосним должен срезать угол оборачиваемого пласта и сбрасывать его на дно борозды впереди корпуса [4]. При глубине пахоты плуга 20...24 см углоснимы крепят в верхней части отвалов основных корпусов, а при глубине 25...27 см — выше рабочей поверхности отвалов с помощью дополнительных кронштейнов. Примером является полувинтовой корпус ПЛП-01 (ПЛД-06) производства ОАО «Минский завод шестерен» [5], углосним на котором закреплен в верхней части груди отвала (рисунок 1, а).



Рисунок 1. — Плужные корпуса с углоснимами: а — ПЛП-01 производства ОАО «Минский завод шестерен»; б — типа МХ плуга UNIA IBIS XM 4+1 (Польша)



Однако углоснимы на плугах, выпускаемых в Беларуси, имеют весьма ограниченные возможности изменения их положения в зависимости от глубины вспашки, твердости верхнего слоя почвы и наличия растительных остатков [2].

Разновидностью углоснимов можно считать дефлекторы (отражатели), которые в настоящее время широко применяются на зарубежных плугах [6]. Дефлекторы устанавливаются над верхним обрезом отвала и предотвращают пересыпание почвы через верхний обрез отвала, а также сгуживание растительных остатков перед стойкой корпуса при максимальной глубине пахоты, при этом на оборот пласта влияют ограниченно (см. рисунок 1, б).

В авторском свидетельстве [7] предложен углосним, хвостовая часть которого имеет коническую поверхность. В работе [8] обоснована серповидная форма углоснима, исследовано влияние его параметров на тяговое сопротивление корпуса, дальность отброса почвы и глубину заделки растительных остатков в почву. Эти и другие конструктивные предложения направлены на улучшение технологических показателей работы углоснимов.

Ряд исследователей предлагают использовать для улучшения качества заделки растительных остатков другие дополнительные рабочие органы — заплужники, щитки и т. п., доворачивающие почвенный пласт после его схода с отвала [1]. На практике широко применяют оснащение укороченного отвала пером, несколько улучшающим оборот пласта (см. рисунок 1, а).

**Материалы и методы исследования.** В полевых условиях нами проводились исследования агротехнических и энергетических показателей вспашки плужным корпусом ПЛП-01 с углоснимом и без него [9].

При оценке агротехнических показателей вспашки исследуемый корпус устанавливали вместо заднего стандартного корпуса на плуг ПЛН-3-35, агрегируемый с трактором МТЗ-82. Полевые опыты проводились на дерново-подзолистой почве, подстилаемой моренным суглинком. Агрофон — стерня пшеницы высотой 0,10...0,20 м, среднее значение абсолютной влажности почвы — 19,5 %, средняя твердость пахотного слоя — 2,58 Мпа, глубина вспашки — 0,20...0,22 м, средняя скорость пахотного агрегата — 2,3 м / с.

При исследовании основных агротехнических показателей работы корпусов использовали специальные методики оценки качества крошения, глыбистости и полноты заделки растительных остатков на основе требований РД 10.4.1-89 [10]. Качество крошения пахотного слоя определяли в шести повторностях на учетных площадках площадью 0,25 м<sup>2</sup>, ширина которых равна ширине захвата исследуемого корпуса (0,35 м). После изъятия проб их разделяли на фракции размером свыше 0,15; 0,15...0,05 и менее 0,05 м, затем взвешивали и находили процентное содержание отдельных фракций в общей массе пробы.

Коэффициенты крошения  $K_{кр}$  и глыбистости  $K_{гл}$  определяли по выражениям:

$$K_{кр} = (m_{<0,05} / m_{пр})100 \%,$$

$$K_{гл} = (m_{>0,15} / m_{пр})100 \%,$$

где  $m_{<0,05}$  — масса фракции с размерами комков менее 0,05 м;

$m_{>0,15}$  — масса фракции с размерами комков более 0,15 м;

$m_{пр}$  — масса всей пробы.

Степень заделки растительных остатков оценивали по массе оставшихся на поверхности пашни пожнивных и растительных остатков. До прохода плуга определяли массу растительного покрова и пожнивных остатков на трех участках площадью 0,25 м<sup>2</sup> путем их среза-

ния и сбора. Отбор проб после вспашки проводили в шести повторностях на участках длиной 3 м, собранную массу высушивали и взвешивали с точностью до 1 г. Коэффициент заделки растительных остатков определяли по формуле

$$K_3 = (1 - m_n / m_p) 100 \%,$$

где  $m_n$  — масса незаделанных растительных остатков на 1 м<sup>2</sup> пашни, кг;

$m_p$  — масса растительных и пожнивных остатков с 1 м<sup>2</sup> участка до прохода исследуемого корпуса, кг.

В ходе статистического анализа результатов сравнительных испытаний вычисляли средние значения показателей, дисперсии и коэффициенты вариации по общепринятым методикам. Анализ данных проводили путем сравнения средних значений величин при групповых сравнениях по критерию Фишера [11, с. 141].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Полученные данные свидетельствуют об улучшении показателей крошения почвы на 4,6 % и заделки растительных остатков на 7,6 % (таблица 1). Применение углоснима обеспечивает практически полную заделку растительных остатков: коэффициент  $K_3$  повысился с 91,7 до 98,7 %.

В отдельных опытах исследовали влияние глубины обработки почвы в диапазоне 0,17...0,23 м на агротехнические показатели работы плужного корпуса ПЛП-01 с углоснимом и без него (таблица 2). Опыты проводились на стерне ячменя высотой 0,10...0,15 м, что соответствует типичным условиям работы плугов в условия северо-западной части Беларуси. Средняя твердость почвы в слое 0...0,15 м равнялась 2,65 МПа, средняя абсолютная влажность почвы — 19,4 %, средняя скорость пахотного агрегата — 1,7...1,8 м / с (6,1...6,5 км / ч). Ширину свободного дна борозды измеряли в 15 повторностях линейкой с точностью до 10 мм по двум проходам исследуемого корпуса («туда» и «обратно»).

При статистическом анализе опытных данных проверяли равенство математических ожиданий методом парных сравнений по критерию Стьюдента [12, с. 139]. Результаты анализа показали следующее.

Ширина свободного дна борозды не зависит от наличия углоснима, но существенно зависит от глубины хода плуга. Так, при увеличении глубины вспашки с 0,17...0,18 до 0,23 м ширина свободного борозды уменьшается с 0,246...0,249 до 0,211...0,214 м.

Все варианты комплектации корпуса и глубины вспашки при вышеуказанных полевых условиях обеспечили примерно одинаковое содержание фракций с размером комков до 0,05 м ( $K_{кр} = 68,2...73,3$  %). Однако наличие углоснима обеспечивает существенное уменьшение содержания глыб размером более 0,15 м как при глубине вспашки 0,17...0,18 м (с 1,45 до 0,6 %), так и при глубине вспашки 0,23 м (с 3,68 до 2,52 %).

Т а б л и ц а 1. — Агротехнические показатели работы корпуса ПЛП-01 с углоснимом и без углоснима, %

Тип корпуса	Коэффициент крошения почвы $K_{кр}$		Коэффициент глыбистости $K_{гп}$		Коэффициент заделки растительных остатков $K_3$	
	среднее значение	коэффициент вариации	среднее значение	коэффициент вариации	среднее значение	коэффициент вариации
Без углоснима	66,9	6,62	7,5	62,10	91,7	3,10
С углоснимом	70,0	1,59	5,0	88,14	98,7	2,14

Т а б л и ц а 2. — Агротехнические показатели работы плужного корпуса ПЛП-01 в зависимости от глубины вспашки

Показатель	Среднее значение	Коэффициент вариации, %	Среднее значение	Коэффициент вариации, %
<i>Без углоснима</i>				
Глубина вспашки, м	0,17	7,8	0,23	5,8
Ширина свободного дна борозды, м	0,249	12,0	0,214	15,0
Коэффициент крошения почвы $K_{кр}$ , %	73,2	12,9	68,2	12,0
Коэффициент глыбистости $K_{гл}$ , %	1,45	34,5	3,68	24,8
Коэффициент заделки растительных остатков $K_3$ , %	93,2	19,9	86,9	20,7
<i>С углоснимом</i>				
Глубина вспашки, м	0,18	8,6	0,23	6,8
Ширина свободного дна борозды, м	0,246	6,9	0,211	8,9
Коэффициент крошения почвы $K_{кр}$ , %	73,2	15,5	73,3	10,5
Коэффициент глыбистости $K_{гл}$ , %	0,60	22,1	2,52	18,9
Коэффициент заделки растительных остатков $K_3$ , %	98,3	16,2	97,8	17,8

При отсутствии углоснима увеличение глубины вспашки с 0,17 до 0,23 м приводит к ухудшению оборота пласта и, соответственно, заделки растительных остатков с 93,2 до 86,9 %. Наличие углоснима обеспечивает стабильную заделку растительных остатков ( $K_3 = 97,8 \dots 98,3$  %) вне зависимости от глубины хода корпуса в исследованном интервале.

Таким образом, наличие углоснима, закрепленного в верхней части отвала в зоне непосредственного воздействия на верхний слой почвенного пласта, существенно влияет на глыбистость вспаханной почвы и полноту заделки растительных остатков.

С другой стороны, наличие дополнительных трущихся поверхностей и большая кривизна рабочей поверхности углоснимов создает предпосылки к существенному увеличению энергозатрат на вспашку. Для определения тягового сопротивления был использован метод линейного динамометрирования с регистрацией продольной составляющей сопротивления корпуса. Опыты проводили на дерново-подзолистой почве, подстилаемой моренным суглинком, на различных агрофонах (черный пар, стерня зерновых, залежь), при этом контролировали абсолютную влажность почвы и твердость в слое до 25 см с помощью твердомера Ревякина.

В результате обработки осциллограмм получены средние значения и коэффициент вариации тягового сопротивления плужного корпуса ПЛП-01 с углоснимом, а также без углоснима (таблица 3).

В результате установлено, что установка углоснима приводит к существенному увеличению тягового сопротивления плужного корпуса в среднем на 18,4 % при вспашке рыхлой почвы, на 9,5 % — при вспашке стерни зерновых и на 13,8 % — при обработке задернелой почвы.

Т а б л и ц а 3. — Результаты динамометрирования плужного корпуса ПЛП-01 при глубине вспашки 0,20...0,22 м на различных агрофонах

Условия проведения опыта	Комплектация корпуса	Скорость пахотного агрегата, км / ч	Удельное тяговое сопротивление	
			среднее значение, кПа	коэффициент вариации, %
Агрофон — черный пар, абсолютная влажность почвы — 13,0 %, средняя твердость почвы — 0,72 МПа	С углоснимом	8,17	59,27	4,83
	Без углоснима	7,83	50,03	4,21
Агрофон — стерня яровых, абсолютная влажность почвы — 17,4 %, средняя твердость почвы — 2,45 МПа	С углоснимом	8,17	68,10	5,14
	Без углоснима	8,30	62,20	9,13
Агрофон — задернелая почва после уборки многолетних трав, абсолютная влажность почвы — 18,9 %, средняя твердость почвы — 3,83 МПа	С углоснимом	8,50	102,13	3,54
	Без углоснима	8,40	89,73	5,62

**Закключение.** В результате проведенных нами полевых опытов установлено, что углоснимы при их установке в верхней части отвалов плужных корпусов ПЛП-01 достаточно интенсивно воздействуют на обрабатываемый пласт почвы. Показатели крошения почвы, глыбистости и заделки растительных остатков при обработке стерни зерновых значительно лучше, чем при использовании плужных корпусов без углоснимов. Однако установка углоснимов приводит к существенному (на 9,5...18,4 %) увеличению тягового сопротивления плужных корпусов.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что применение углоснимов на данных плужных корпусах оправдано, когда требуется хорошее крошение почвы при полной заделке растительных остатков (например, при подготовке почвы под посев озимых культур). При вспашке рыхлой почвы (при перепашке после уборки пропашных культур — картофеля, свеклы и др.) целесообразно использовать менее энергоемкие способы обеспечения улучшения оборота пласта и заделки растительных остатков.

#### Список цитируемых источников

1. *Василенко, В. В.* Роль предплужников в историческом развитии плугов / В. В. Василенко, С. В. Василенко, П. С. Востриков // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В. А. Гулевского. — 2018. — Воронеж : Воронеж. гос. аграр. ун-т им. Императора Петра I. — С. 32—38.
2. Состояние и основные направления развития плугостроения в Республике Беларусь / А. А. Точицкий [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межведомств. темат. сб. : в 2 т. — Минск : Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по механизации сел. хоз-ва, 2009. — Вып. 43, т. 1. — С. 76—83.
3. *Харитонова, Д.* Верный пахарь. Особенности выбора и эксплуатации плугов [Электронный ресурс] / Д. Харитонова // Агротехника и технологии. — 2018. — № 1. — Режим доступа: <https://www.agroinvestor.ru/tech/article/29285-vernyu-pakhar-osobennosti-vybora-i-ekspluatatsii-plugov>. — Дата доступа: 05.02.2021.
4. Технологические настройки и регулировки почвообрабатывающих и посевных машин [Электронный ресурс] // Сайт РУП «Научно-практический центр национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства». 2018. — 30.04.2018. — Режим доступа: <https://belagromech.by/news/tehnologicheskie-nastrojki-i-regulirovki-pochvoobrabatyvayushhih-i-posevnyh-mashin>. — Дата доступа: 15.02.2021.

5. Корпуса для плугов [Электронный ресурс] / Сайт ОАО «Минский завод шестерен». — Режим доступа: <https://mgw.by/products/plows/corps> . — Дата доступа: 14.02.2021.

6. *Насритдинов, А. А.* Оптимальные условия установки углоснима / А. А. Насритдинов, А. В. Рязанов // *Техника в сел. хоз-ве.* — 2003. — № 6. — С. 34—35.

7. Корпус плуга : а. с. 1085524 СССР : МКИ А 01 В 15/00 / Е. Д. Афонин, П. Н. Бурченко, А. Е. Афонин и др. (СССР) ; дата публ. 15.04.1984 // *Открытия. Изобретения : бюллетень.* — 1985. — № 14.

8. *Рязанов, А. В.* Обоснование параметров углоснима к корпусу оборотного плуга : дис. ... канд. техн. наук. — Янгиюль, 2002. — 141 л.

9. *Дубень, И. В.* Совершенствование технологического процесса вспашки корпусами с пластинчатыми отвалами : дис. ... канд. техн. наук. — Горки, 2002 — 134 л.

10. Машины и орудия для глубокой обработки почвы. Программа и методы испытаний : взамен ОСТ 70.4.1-74 (с изм.) : введ. 01.05.89.

11. *Короткевич, А. В.* Основы испытаний сельскохозяйственной техники : учеб. пособие / А. В. Короткевич. — Минск : Бел. аграр.-техн. ун-т, 1997. — 444 с.

12. *Айвазян, С. А.* Прикладная статистика. Applied statistics: основы моделирования и первичная обработка данных : справ. изд. / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. — М. : Финансы и статистика, 1983. — 471 с.

Поступила в редакцию 09.09.2021.

УДК 637.116.5

**П. Ю. Крупенин**, кандидат технических наук

Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», ул. Мичурина, 5, 213407 Горки, Республика Беларусь, +375 (29) 337 28 97, pavel@krupenin.com

## АНАЛИЗ ФАЗОВОГО ПОРТРЕТА ПУЛЬСАЦИЙ ДОИЛЬНОГО АППАРАТА

Статья посвящена процессу диагностирования технического состояния доильных аппаратов с помощью современных приборов проверки доильных установок и последующему анализу полученных данных. Описан алгоритм анализа пульсаций сосковой резины в доильных стаканах по частоте и фазовому портрету, под которым подразумевается длительность отдельных фаз в рабочем цикле доильного аппарата. Рассмотрен современный подход к делению рабочего цикла доильного аппарата на отдельные такты и фазы. Проведен анализ влияния длительности отдельных фаз на физиологичность процесса машинного доения коров. Систематизированы данные об оптимальных интервалах варьирования продолжительности фаз в рабочем цикле доильного аппарата. Выполнен анализ влияния изменений в длительности отдельных фаз на скорость молокоотдачи и состояние здоровья животного после доения. Описано влияние деградации упругих свойств сосковой резины, происходящей в процессе ее эксплуатации, на изменения в фазовом портрете доильного аппарата. Обусловлена важность обеспечения одинакового режима работы для всех доильных аппаратов в составе доильной установки.

**Ключевые слова:** доильный аппарат; пульсация; сосковая резина; диагностирование; физиология машинного доения.

Рис. 3. Библиогр.: 6 назв.

**P. Y. Krupenin**, PhD in Technical SciencesBelarusian State Agricultural Academy, 5 Michurina Str., 213407 Horki, the Republic of Belarus  
+375 (29) 337 28 97, pavel@krupenin.com

## ANALYSIS OF THE PHASE PORTRAIT OF MILKING MACHINE PULSATIONS

The article is devoted to the process of diagnosing the technical condition of milking machines by using modern diagnostic devices and the subsequent analysis of obtained data. The algorithm for analyzing teat cups pulsations by frequency and phase portrait is described by which is meant the duration of individual phases in the working cycle of the milking machine. A modern approach to dividing the working cycle of a milking machine into separate strokes and phases is considered. The influence of the duration of individual phases on the physiological nature of the process of machine milking of cows has been analyzed. The data on the optimal intervals for varying the duration of the phases in the working cycle of the milking machine are systematized. The analysis of the influence of changes in the duration of individual phases on the rate of milk flow and the state of health of the animal after milking has been performed. The influence of degradation of elastic properties of liner during its operation on changes in the phase portrait of the milking machine is described. The importance of ensuring the same operating mode for all milking machines on a farm is noted.

**Key words:** milking machine; pulsation; liner; diagnosis; physiology of machine milking.

Fig. 3. Ref.: 6 titles.

**Введение.** В современных условиях отрасль животноводства функционирует на основе интенсивных технологий, предусматривающих высокие уровни механизации и автоматизации производственных процессов, в связи с чем ее техническое переоснащение приобретает совершенно новое смысловое наполнение. В последние годы достаточно четко наметилось изменение вектора развития технических средств в животноводстве от создания техники для обеспечения существующих технологий к разработке новых технологических решений на базе принципиально новых машин и оборудования [1].

В сложившихся обстоятельствах существенным резервом повышения эффективности машинного доения коров является формирование комплексного подхода к механизации данной операции при учете всех нюансов и тонкостей физиологии животного. Используемые на молочно-товарных фермах и комплексах технологические приемы и оборудование для доения должны иметь взаимосвязь между элементами триединой системы «человек—машина—животное», в которой даже малое отклонение от нормы может стать фактором негативного влияния как на качество получаемой продукции, так и на здоровье животного [2; 3].

К сожалению, в ряде сельскохозяйственных предприятий все еще сохраняется поверхностный подход к средствам механизации животноводческих ферм и комплексов. В результате небрежного отношения к технике, неправильной ее эксплуатации и плохой организации технического обслуживания такие предприятия несут существенные потери. Своевременная диагностика и обслуживание доильного оборудования позволяют избежать негативных последствий, проявляющихся в падении продуктивности и росте числа больных животных [4].

Для диагностирования доильных установок применяют специализированное оборудование. Из отечественных образцов подобного оборудования следует отметить прибор проверки доильных установок ППДУ-01, позволяющий измерять уровень вакуумметрического давления в статических и динамических режимах работы доильного оборудования, расход воздуха и частоту вращения ротора вакуумного насоса. Прибор включен в Государственный реестр средств измерений (сертификат № 11282) и допущен к применению на территории Республики Беларусь [5]. Однако несмотря на широкий функционал прибора, ни в его руководстве по эксплуатации, ни в рекомендованной для студентов агроинженерных специальностей учебной литературе не описана методика анализа результатов измерений фазового портрета пульсаций сосковой резины при работе доильного аппарата.

**Материалы и методы исследования.** Для определения параметров пульсаций сосковой резины используется диагностический режим «АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ» прибора проверки доильных установок ППДУ-01. При выполнении измерений входы 1—4 (рисунок 1) датчиков вакуумметрического давления подключают к межстенным камерам стаканов доильного аппарата. Подключение измерительного блока 7 прибора осуществляют с помощью силиконовых трубок 6 и тройников 3, устанавливаемых в разрыв между вакуумными трубками 2 и штуцерами гильз доильных стаканов 4. Отверстия в головках стаканов закрывают имитирующими сосок заглушками 5. При диагностировании доильных аппаратов попарного доения входы 1 и 2 измерительного блока должны быть подключены к разным каналам пульсатора 1.

Результаты измерений могут быть представлены на экране прибора в графическом или табличном виде. Графическое представление (рисунок 2, а) позволяет визуально оценить пульсации давления во всех четырех доильных стаканах. При переводе прибора в табличный режим (см. рисунок 2, б) на его экране отображаются численные значения параметров пульсаций: частота пульсаций  $N$ ; длительность фаз  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ; длительность тактов сосания  $E$  и сжатия  $F$ ; максимальное и минимальное вакуумметрические давления в межстенных камерах доильных стаканов; длительность периода полного давления  $EFAM$ .

Пульсации сосковой резины в доильных стаканах анализируются по таким показателям, как частота и фазовый портрет, под которым подразумевается длительность отдельных фаз в рабочем цикле доильного аппарата.

Значение частоты пульсаций представляет собой количество рабочих циклов доильного аппарата, совершаемых за 1 минуту. Частота пульсаций  $N$  и продолжительность рабочего цикла  $T$  связаны соотношением  $N = 1 / T$ . Фактическое значение частоты пульсаций  $N$  при работе доильного аппарата должно соответствовать его технической характеристике. Для модулей управления доением укомплектованных электромагнитными пульсаторами фактическая частота пульсаций должна находиться в пределах  $\pm 5\%$  от рекомендованного производителем значения.

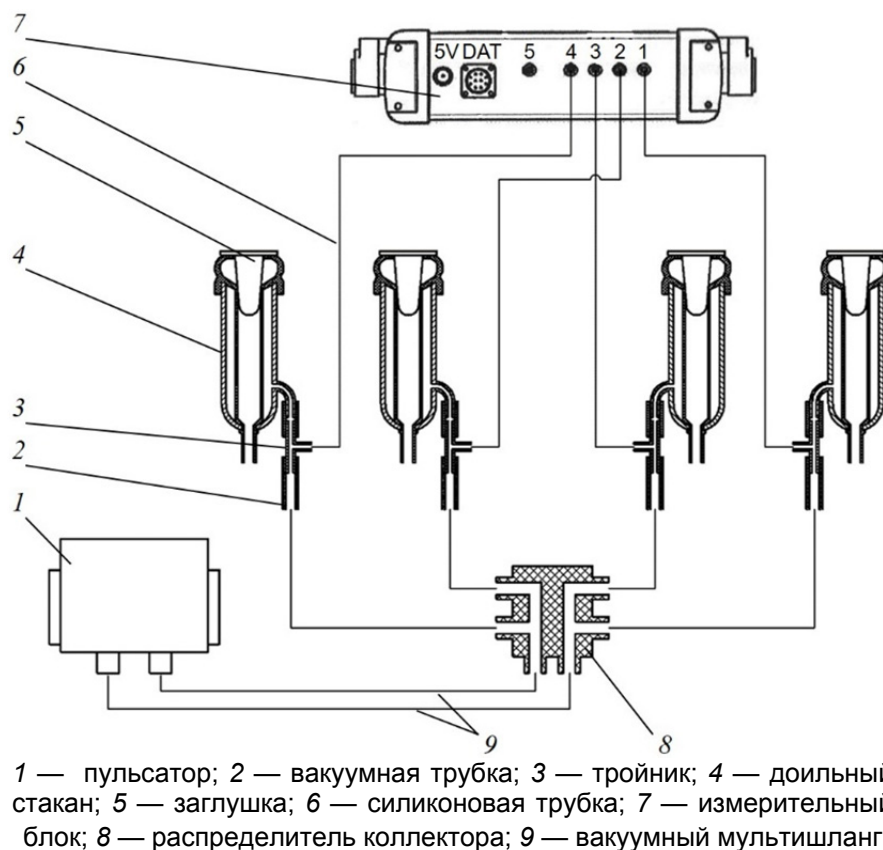
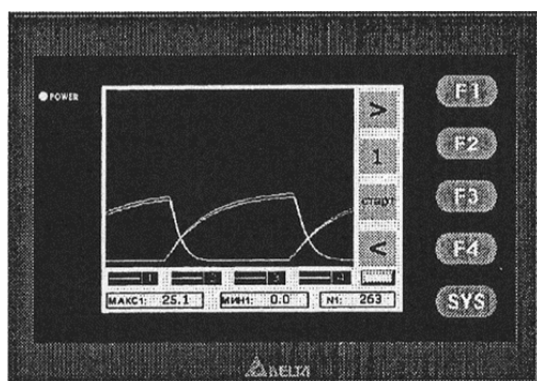
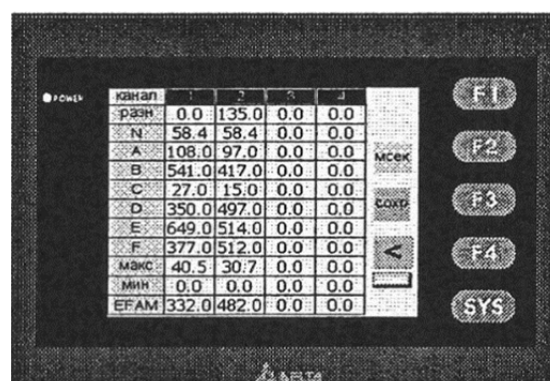


Рисунок 1. — Схема подключения прибора ПДУ-01



а)



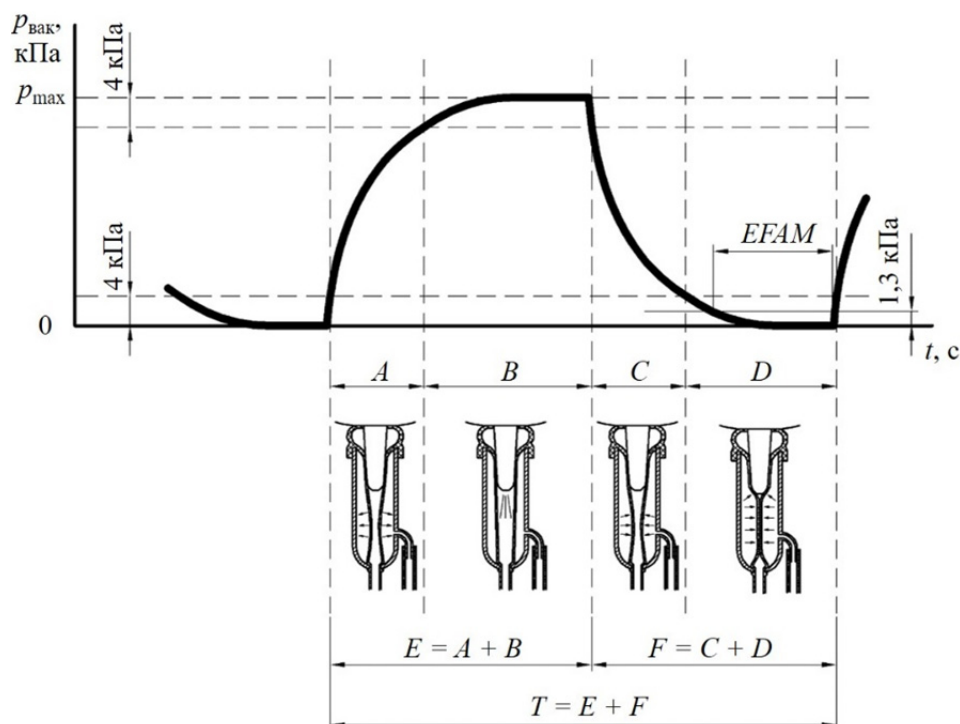
б)

Рисунок 2. — Представление результатов измерения на экране прибора:  
а — графический вид; б — табличный вид

**Результаты исследования и их обсуждение.** В соответствии со стандартом ISO 5707:2007 [6] рабочий цикл двухтактного доильного аппарата делится на четыре фазы, обозначаемые латинскими буквами *A*, *B*, *C* и *D* (рисунок 3).

Фазой *A* называют часть рабочего цикла *T* доильного аппарата, в ходе которой разрежение в межстенной камере увеличивается с 4 кПа до уровня, расположенного на 4 кПа ниже максимального значения вакуумметрического давления  $p_{\max}$ . В этой фазе осуществляется переход сосковой резины из закрытого (сжатого) состояния в открытое.





*A* — фаза открытия сосковой резины; *B* — фаза, в ходе которой сосковая резина находится в открытом состоянии; *C* — фаза закрытия сосковой резины; *D* — фаза, в ходе которой сосковая резина находится в закрытом состоянии; *E* — такт сосания; *F* — такт сжатия; *T* — рабочий цикл; *EFAM* — период полного давления

**Рисунок 3. — Схема рабочего цикла двухтактного доильного аппарата**

В фазе *B* вакуумметрическое давление в межстенной камере доильного стакана находится в пределах от  $p_{\max}$  до  $(p_{\max} - 4 \text{ кПа})$ . Во время этой фазы сосковая резина полностью открыта и молоко выводится из соска. Очевидно, что продолжительность этой фазы оказывает непосредственное влияние на скорость доения: чем дольше длится фаза *B*, тем быстрее будет происходить выдаивание животного. Однако кроме извлечения молока из вымени в фазе *B* также происходит интенсивный отток внеклеточных жидкостей (кровь, лимфа и др.) к кончику соска. В нормально работающем доильном аппарате эти жидкости возвращаются обратно (выдавливаются к основанию соска) во время такта сжатия. Но если на фазу *B* будет отведено слишком много времени, то длительности такта сжатия окажется недостаточно для полного размассирования скопившихся в кончике соска жидкостей. Как следствие, кончик твердеет, открытие сфинктера соска происходит неполноценно, поток молока закономерно снижается.

Получается, что слишком продолжительная фаза *B*, в ходе которой сосковая резина находится в открытом состоянии, приводит к обратному эффекту: поступление молока из сосков снижается, а время доения животного увеличивается. Одновременно с этим по причине увеличения времени доения и уменьшения скорости молокоотдачи в соске под воздействием вакуума могут происходить нежелательные изменения тканей и раздражения, которые, в свою очередь, повышают риск развития воспаления вымени.

Однако и слишком короткая фаза *B* оказывает отрицательное воздействие на эффективность процесса доения. В этом случае интервал времени, в ходе которого стенки сосковой

резины остаются открытыми, становится слишком коротким, а доение животного длится дольше. Производительность доильного оборудования снижается, а суммарное время, в течение которого сосок находится под вакуумом, увеличивается, что негативно влияет на состояние здоровья вымени в целом.

Стандартом ISO 5707:2007 предписано, что фаза  $B$  должна занимать не менее 30 % времени рабочего цикла  $T$  доильного аппарата. В большинстве моделей современного доильного оборудования продолжительность этой фазы составляет 450...500 мс.

Фазы  $A$  и  $B$  вместе образуют такт сосания  $E$ , длительность которого определяется конструкцией и настройками пульсатора доильного аппарата. Поскольку  $E = A + B$ , то любое изменение в длительности любой из фаз влечет за собой обратное изменение другой фазы. Например, если фаза  $A$  увеличится на 50 мс, то фаза  $B$  неизбежно сократится на тех же 50 мс. Из этого следует, что фаза  $A$  не должна быть слишком долгой, поскольку в этом случае она будет автоматически укорачивать фазу извлечения молока  $B$ , что приведет к снижению производительности доильного аппарата. Производители доильного оборудования рекомендуют использовать значение в 140 мс в качестве верхней границы продолжительности фазы  $A$ .

С другой стороны, чрезмерно короткая фаза  $A$  также нежелательна. В этом случае сосковая резина раскрывается слишком быстро, объем подсосковой камеры резко увеличивается, что создает скачек вакуумметрического давления и разрежение в подсосковой камере становится больше, чем в коллекторе. Образование дополнительного разрежения нежелательно, поскольку при этом создаются условия для обратного движения (удара) молока из коллектора в доильный стакан. Обратный удар молока не только нарушает рабочий процесс доильного аппарата, но и является фактором риска переноса инфекции от больной доли вымени к здоровым. Для предотвращения обратного удара молока фаза  $A$  должна иметь продолжительность не менее 100 мс.

Во время фазы  $C$  вакуумметрическое давление в межстенной камере доильного стакана снижается с уровня ( $p_{\max} - 4$  кПа) до 4 кПа и сосковая резина переходит из открытого состояния в закрытое. Фаза  $C$  должна составлять не менее 8 % времени рабочего цикла  $T$ . Производители доильного оборудования рекомендуют выдерживать продолжительность фазы  $C$  в пределах 100...130 мс. Более короткая фаза приводит к слишком быстрому закрытию сосковой резины с последующим резким ударом (хлопком) по соску, что вызывает у животных неприятные ощущения, выражающиеся в беспокойстве и попытках сбросить доильный аппарат с вымени.

Процесс закрытия сосковой резины в фазе  $C$  протекает аналогично ее открытию в фазе  $A$ . Продолжительность фаз  $A$  и  $C$  зависит не только от конструкции пульсатора, коллектора и длины вакуумных шлангов, но и от эластичности сосковой резины. Более жесткая сосковая резина быстрее переходит из закрытого (сжатого) состояния в открытое и медленнее в обратном направлении — из открытого в закрытое. Из этого следует, что при увеличении жесткости сосковой резины фаза  $A$  сокращается, а фаза  $C$  становится более продолжительной. Поскольку длительность тактов сосания  $E = A + B$  и сжатия  $F = C + D$  постоянна, то одновременно с коррекцией фаз  $A$  и  $C$  происходит симметричное увеличение фазы  $B$ , в ходе которой сосковая резина открыта, и сокращение фазы  $D$ , во время которой стенки сосковой резины сжимают сосок. Таким образом, увеличение жесткости сосковой резины приводит к более «агрессивному» воздействию доильного аппарата: длительность периода извлечения молока увеличивается, а длительность периода отдыха, напротив, сокращается.

В фазе  $D$  сосковая резина остается закрытой и оказывает массирующее действие на сосок, в результате которого скопившиеся в его кончике внеклеточные жидкости возвращаются обратно к вымени. Благодаря этому кончик соска остается мягким, в фазе  $B$  молоко может беспрепятственно и равномерно выходить из камеры соска в доильный стакан.

Слишком быстрая фаза  $D$  не обеспечивает достаточного эффекта, поскольку давление на сосок должно оказываться в течение определенного времени. Для более точного

учета интервала времени, на протяжении которого сосковая резина оказывает полноценное давление на сосок, в пределах фазы *D* выделяют период *EFAM*. Под периодом *EFAM* понимают время, в течение которого вакуумметрическое давление в межстенной камере доильного стакана не превышает 1,3 кПа. Согласно современным представлениям о физиологичности машинного доения считается, что фаза *D* должна составлять не менее 15 % от времени рабочего цикла *T* или не менее 150...170 мс, при этом длительность периода полного давления *EFAM* должна быть не менее 150 мс.

Верхняя граница варьирования оптимальной продолжительности фазы *D* составляет 280 мс. Более длительная фаза *D* часто является причиной бескровных и поэтому слишком вялых кончиков сосков, становящихся такими, когда в результате долгого давящего воздействия из них было отмассировано слишком много крови и других жидкостей. В этом случае требуется больше времени на то, чтобы при наступлении фазы *B* сфинктер соска смог полноценно открыться, а следовательно, доение животного будет происходить медленнее.

Особое внимание при диагностировании доильной установки должно уделяться обеспечению одинакового режима работы для всех ее доильных аппаратов. Существенная разница частоты пульсаций или фазового портрета между доильными аппаратами приводит к маститу и снижению продуктивности коров.

**Заключение.** Условием физиологичного доения является минимизация воздействий на соски, приводящих к изменениям их формы или состояния. Только при его соблюдении операторы машинного доения могут быть уверены, что корова воспринимает доение как приятную процедуру. В противном случае, когда доильный аппарат оказывает негативный эффект на состояние сосков, молокоотдача снижается, а риск возникновения мастита повышается. Анализ фазового портрета доильного аппарата позволяет детально оценить физиологичность процесса машинного доения, на ранней стадии выявить и устранить возможные отклонения в работе пульсатора, а также определить ухудшение упругих свойств сосковой резины.

#### Список цитируемых источников

1. Проблемы внедрения интенсивных технологий производства молока / А. Ф. Трофимов [и др.] // Актуальные проблемы интенсификации производства продукции животноводства : тез. докл. Междунар. науч.-производств. конф. — Жодино, 2005. — С. 120—121.
2. Крупенин, П. Ю. Методика расчета конструктивных параметров четырехкамерного коллектора доильного аппарата / П. Ю. Крупенин, Д. К. Гупало // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2019. — № 4. — С. 153—160.
3. Современные технологии производства продукции животноводства : рекомендации / В. К. Пестис [и др.] ; под общ. ред. В. К. Пестиса, Е. А. Добрука. — Гродно : ГГАУ, 2011. — 462 с.
4. Рекомендации по техническому сервису доильного оборудования / М-во сел. хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь, НПЦ НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва ; подгот.: С. К. Карпович [и др.] ; под общ. ред. С. К. Карповича. — Минск : БГАТУ, 2015. — 124 с.
5. Приборы проверки доильных установок ППДУ-01 // Гос. информ. фонд по обеспечению единства измерений [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://oei.by/grsi/view?id=4391357>. — Дата доступа: 04.04.2021.
6. Установки доильные. Конструкция и рабочие характеристики : ISO 5707:2007. — Введ. 15.02.2007. — Женева : Междунар. организация по стандартизации, 2007. — 60 с.

Поступила в редакцию 09.09.2021.

УДК 631.333:519.711.3(476.6)

**А. И. Филиппов**<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент;**С. Д. Лещик**<sup>2</sup>, кандидат технических наук, доцент;**Ю. К. Калугин**<sup>2</sup>, кандидат технических наук, доцент;**И. В. Дубень**<sup>3</sup>, кандидат технических наук, доцент<sup>1</sup>Учреждение образования «Гродненский государственный аграрный университет», ул. Терешковой, 28, 230008 Гродно, Республика Беларусь, +375 (29) 396 29 66, a.fil07@mail.ru<sup>2</sup>Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», ул. Ожешко, 22, 230023 Гродно, Республика Беларусь, +375 (0152) 48 27 94, s.lesh@grsu.by, kalugin\_jk@grsu.by<sup>3</sup>Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Парковая, 62, 225401 Барановичи, Республики Беларусь, +375 (163) 64 06 73, duben\_i\_v@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РАЗБРАСЫВАНИЯ УДОБРЕНИЙ

Предложена технология компьютерного моделирования и процесса оптимизации результатов разбрасывания удобрения дисковым разбрасывателем в зависимости от параметров процесса и конструктивно-технологических параметров дискового разбрасывателя, основанная на имитационных алгоритмах, реализующих процесс разбрасывания удобрений, а также аналитической модели оптимизации процесса по критерию минимизации неравномерности разбрасывания удобрений.

**Ключевые слова:** дисковый разбрасыватель; оптимизация процесса; компьютерное моделирование; удобрения; конструктивно-технологические параметры; имитационно-статистическая модель.

Рис. 5. Библиогр.: 16 назв.

**A. I. Filippov**<sup>1</sup>, PhD in Technical Sciences, Associate Professor;**S. D. Leshchik**<sup>2</sup>, PhD in Technical Sciences, Associate Professor;**Yu. K. Kalugin**<sup>2</sup>, PhD in Technical Sciences, Associate Professor;**I. V. Duben**<sup>3</sup>, PhD in Technical Sciences, Associate Professor<sup>1</sup>Grodno State Agrarian University, 28 Tereshkova Str., 230008 Grodno, the Republic of Belarus, +375 (29) 396 29 66, a.fil07@mail.ru<sup>2</sup>Yanka Kupala State University of Grodno, 22 Ozheshko Str., 230023 Grodno, the Republic of Belarus, +375 (0152) 48 27 94, s.lesh@grsu.by, kalugin\_jk@grsu.by<sup>3</sup>Educational institution "Baranovichi State University", 62 Parkovaya Str., 225401 Baranovichi, the Republic of Belarus, Tel. +375 (163) 64 06 73, duben\_i\_v@mail.ru

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A MODEL FOR OPTIMIZING THE FERTILIZER SPREADING PROCESS

The technology of computer modeling and the process of optimizing the results of fertilizer spreading by a disc spreader, depending on the process parameters and design and technological parameters of the disc spreader, is proposed. It is based on simulation algorithms that implement the process of spreading fertilizers, as well as an analytical model for optimizing the process by the criterion of minimizing the unevenness of fertilizer spreading.

**Key words:** disc spreader; process optimization; computer modeling; fertilizers; design and technological parameters; simulation and statistical model.

Fig. 5. Ref.: 16 titles.

**Введение.** В республике основной парк машин для внесения твёрдых минеральных удобрений (более 90 %) составляют центробежные дисковые разбрасыватели. Основными их рабочими органами являются один либо два разбрасывающих диска с механическим либо

гидроприводом, бункер для удобрений с установленным в его нижней части пальцем-ворошителем, который обеспечивает перемешивание и равномерную подачу удобрений к дозирующему устройству. Разбрасывающие диски по форме могут быть плоские, сферические, с разным количеством лопастей и некоторыми другими конструктивными отличиями.

Рабочий процесс разбрасывания удобрений характеризуется наличием двух последовательных фаз. В первой фазе частицы удобрения находятся на рабочей поверхности диска и непосредственно с ней взаимодействуют. Во второй фазе частицы материала, получив необходимую скорость, покидают диски и совершают свободный полет до соприкосновения с поверхностью почвы.

Параметры процесса разбрасывания (направление, скорость, дальность полета) зависят от ряда управляемых факторов, в частности, от параметров диска, а также случайных возмущений [1—3], и могут быть оптимизированы на основе компьютерного моделирования взаимодействия разбрасывающих дисков с удобрениями в вышеперечисленных фазах. Основу моделирования составляют разработанные имитационные алгоритмы и аналитическая модель оптимизации процесса разбрасывания удобрения по критерию минимизации неравномерности разбрасывания удобрения в зависимости от конструктивно-технологических параметров дискового разбрасывателя.

**Материалы и методы исследования.** В качестве объекта исследования принят навесной разбрасыватель удобрений РДУ-1,5, агрегируемый с тракторами тяговых классов 1,4—2,0 и предназначенный для внесения в почву сухих гранулированных, кристаллических удобрений и семенного материала (рисунки 1, 2). Объем бункера — 1,1 м<sup>3</sup>, диапазон доз внесения — 50...500 кг / га, максимальная полезная нагрузка (без насадок) — 1 500 кг, рабочая ширина разбрасывания — 10...28 м, эксплуатационная производительность агрегата — до 15 га / ч. Разбрасывание осуществляется двумя дисками. Допустимое отклонение от установленной дозы внесения — ±10 %.



Рисунок 1. — Общий вид разбрасывателя удобрений РДУ-1,5



Рисунок 2. — Разбрасывающие диски дискового разбрасывателя удобрений (вид сбоку)

**Результаты исследования и их обсуждение.** Процесс работы дискового разбрасывателя состоит в следующем. Бункер, дно которого изготовлено из высококачественной нержавеющей стали, предназначен для хранения удобрений во время работы агрегата. Палец-ворошитель в нижней части бункера, вращающийся со скоростью 180 об./мин, полностью охватывает дозирующие выгрузные окна, препятствует их забиванию и обеспечивает свободный выход удобрений без разрушения гранул. Установка дозы внесения удобрений определяется рабочей шириной выгрузного окна. Разбрасывающие диски, вращающиеся в разные стороны со скоростью 980 об./мин, с помощью лопаток сообщают гранулам удобрений определенную скорость для рассеивания по обрабатываемой площади поля [4—7].

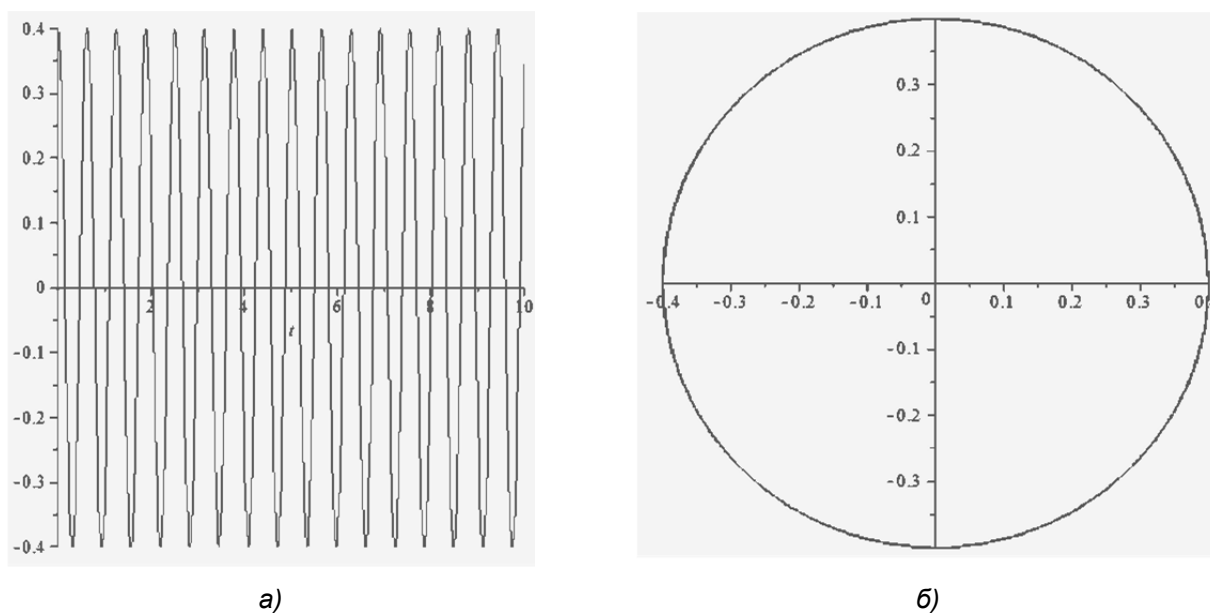
Основным критерием качества работы разбрасывателя удобрений является неравномерность разбрасывания по рабочей ширине захвата, которая у данной машины составляет  $\pm 20\%$  и зависит от установленной дозы внесения, параметров выгрузных окон (регулируемый размер, конфигурация), формы и расположения лопастей на дисках и т. д. Для улучшения равномерности разбрасывания можно использовать рассеивающие диски различных конструкций и оптимизировать их конструктивные параметры — форму рабочей поверхности и диаметр дисков, количество и форму закрепленных на них лопаток, высоту расположения над землей и т. д. [8—11].

В связи с этим возникает задача разработки компьютерной модели и ее реализации, позволяющей исследовать и оптимизировать процесс разбрасывания удобрения в зависимости от параметров работы дискового разбрасывателя, в первую очередь по критерию неравномерности разбрасывания. В данной статье рассматривается моделирование плотности рассеивания удобрений без учета случайных возмущений и моделирование местоположения удобрений на земле с учетом угла схода частицы с диска.

Рассмотрим кинематику движения частицы удобрений по поверхности диска. Уравнение движения точки на краю диска радиусом  $R$ , вращающегося с угловой скоростью  $\omega$ , выглядит следующим образом:

$$X = R \cos \omega t; \quad Y = R \sin \omega t.$$

Построим теоретическую кривую движения точки на краю диска при  $R = 0,4$  м,  $\omega = 10$  рад/с в интервале времени  $t = 0 \dots 10$  с (рисунок 3).



**Рисунок 3. — Теоретическая кривая движения точки на краю диска:  
а — относительно оси X; б — в плоскости XY**

Построим уравнение движения разбрасываемых частиц после отрыва от края диска при поступательном движении машины в направлении оси  $y$  со скоростью  $V = 1,5 \dots 4,0$  м / с. При перпендикулярном направлении отрыва частиц относительно касательной к краю диска на расстояние  $L$  получим следующие переменные и уравнения, описывающие процесс:

$$L = \frac{\log\left(k_n T + \frac{1}{V_p}\right) \log\left(\frac{1}{V_p}\right)}{k_n}, \quad (1)$$

где  $T$  — время перемещения частиц удобрений до соприкосновения с землей, с:

$$T = \sqrt{\frac{2H}{g}},$$

где  $H$  — высота расположения дисков относительно уровня земли, м;  
 $k_n$  — коэффициент парусности:

$$k_n = \frac{k\gamma F}{gm},$$

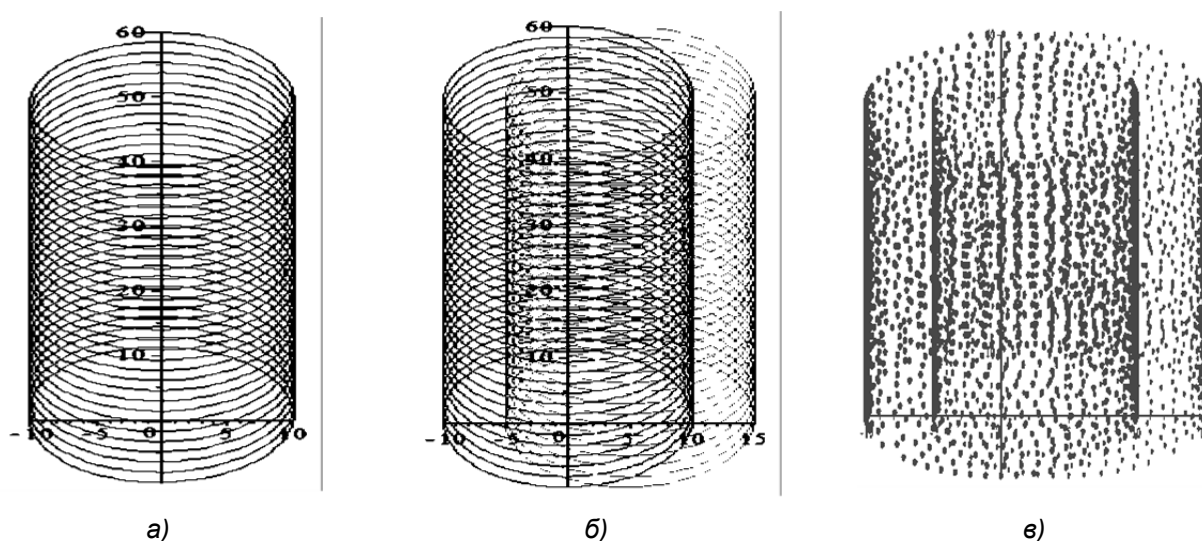
где  $F$  — миделево сечение частицы удобрений, м<sup>2</sup>;

$\gamma$  — объемная масса воздуха, кг / м<sup>3</sup>;

$m$  — масса частицы удобрений, кг;

$V_p$  — начальная скорость частицы удобрений при сходе с диска, м / с.

Решая уравнение (1) при начальных значениях  $k_n = 0,3$ ,  $H = 0,4$  м,  $R = 0,4$  м,  $\omega = 10$  рад / с и  $t = 0 \dots 10$ , получим теоретические кривые движения точки относительно осей координат в горизонтальной плоскости (рисунок 4).



**Рисунок 4 — Теоретические кривые движения точки на краю диска относительно осей  $X$  и  $Y$  при поступательном движении машины со скоростью  $V$ : а — без учета погрешности рассева на машине с одним диском; б — без учета погрешности рассева на машине с двумя дисками; в — с учетом погрешности рассева на машине с двумя дисками**

Вышеприведенная модель позволяет построить теоретические кривые движения точки на краю диска относительно осей  $X$  и  $Y$  с учетом погрешности рассева для машины с двумя дисками, которая движется поступательно с постоянной скоростью (см. рисунок 4, в).

Рассмотрим модель плотности рассева удобрений по поверхности почвы с учетом угла схода  $\theta_{cx}$  частицы с диска. Весь процесс происходит аналогично предыдущей модели, однако учитывается, что частицы удобрений слетают с диска не под углом  $90^\circ$  относительно касательной к наружной кромке диска, а под углом  $\theta_{cx}$  [12—14].

Уравнения для расчета координат распределения по земле частиц после отрыва под углом  $\theta_{cx}$  от края диска радиусом  $r$ , вращающегося со скоростью  $\omega$ , расположенного на машине, которая движется поступательно со скоростью  $V$  в направлении оси  $Y$  на расстояние  $L$ , имеют следующий вид (рисунок 5):

$$\begin{cases} X = N \cos(\omega t + \alpha); \\ Y = N \sin(\omega t + \alpha) + Vt, \end{cases}$$

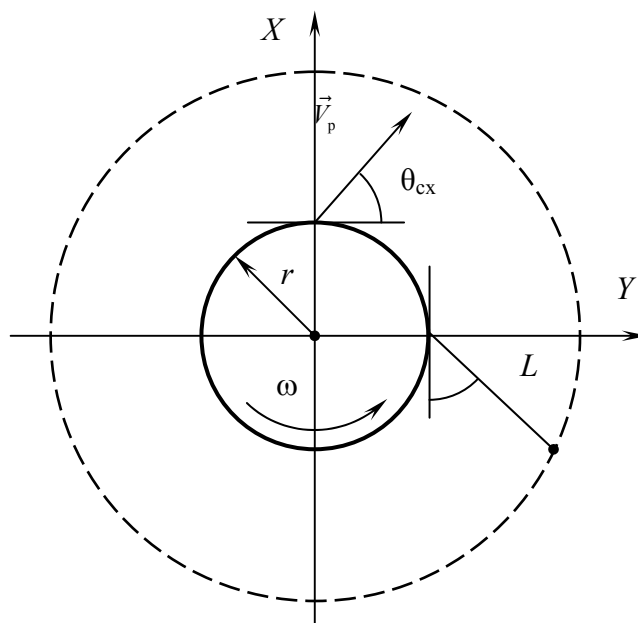
где  $N = \sqrt{r^2 + L^2 + 2rL \sin \theta_{cx}}$  — геометрическое место (координаты) распределения удобрений по поверхности поля после отрыва от диска под определенным углом;

$\alpha = \arcsin \frac{L \cos \theta_{cx}}{N}$  — угол ориентации сектора рассева относительно движения машины.

Геометрическое место распределения частиц по поверхности поля при остановленной машине ( $V = 0$ ) с учетом дальности их падения от диска  $L$ , радиуса диска  $r$ , угла схода  $\theta_{cx}$  и начальной скорости  $V_p$  частиц представлено окружностью большего диаметра на рисунке 5.

В идеальном случае при абсолютно равномерном распределении частиц по поверхности почвы плотность расположения частиц будет одинаковой на любом участке поля. Чем больше разница в плотности распределения между различными участками, тем больше неравномерность.





**Рисунок 5.** — Геометрическое место распределения частиц по поверхности поля при неподвижной машине с учетом дальности полета частиц  $L$ , радиуса диска  $r$ , угла схода  $\theta_{cx}$  и начальной скорости  $V_p$

Чтобы подсчитать плотность распределения частиц удобрений, разбиваем расчетную область рассева удобрений по поверхности поля на одинаковые по ширине участки, задав ширину области, а также количество таких участков. Чтобы определить плотность распределения, достаточно вычислить количество вхождений частиц в каждый участок. Для этого в системе компьютерной алгебры Mathematica был реализован цикл:

```

a := -L; b := L; k := 100;
sch := array(1..k);
for x to k do
    sch[x] := 0;
end do;
for x to k do
    lznach[x] := a + (b - a) / k * (x - 1);
    pznach[x] := a * (b - a) / k * x;
    for i to 2500 do
        if M1[i] ≥ lznach[x] and M1[i] ≤ pznach[x] then
            sch[x] := sch[x] + 1;
        end if;
    end do;
end do;

```

Здесь  $a$  и  $b$  — левая и правая границы области рассева удобрений по оси  $X$ . Всю область мы разбиваем на  $k = 100$  участков. Далее создаем массив счетчика  $sch$  размерности  $k$ , элементами которого будет количество попаданий частиц в  $i$ -й участок. Циклом  $if$  проверяем, попадает ли координата частицы по оси  $X$  в определенный участок. В данном цикле в массиве  $M1$  хранятся  $X$ -координат частиц удобрений [15; 16].

После завершения подсчета плотности распределения удобрений получаем массив, количество элементов которого равно количеству делений рассматриваемой области рассева,

затем находим среднее значение в массиве. При абсолютной равномерности на любом участке отклонение плотности от ее среднего значения по полю будет равно нулю. Сравнивая значение по каждому элементу массива со средним, находим разницу, т. е. отклонение от средней нормы:

```
srzn:= 2500/k;  
modul:=array(1..k);  
for i to k do  
    modul[i]:=abs(sch[i]-srzn);  
end do;  
modul();
```

В результате получим интегральное значение неравномерности рассева:

```
IR:=0;  
for j to k do  
    IR:=IR+modul[j];  
end do;
```

**Заключение.** В данной статье предложена модель движения частиц удобрений при работе дискового рассеивающего аппарата и ее программная реализация в двух фазах — при движении по рабочей поверхности дисков и при распределении по поверхности почвы, которая учитывает параметры разбрасывателя, процесса разбрасывания, а также возможные случайные возмущения.

Программная реализация модели позволяет автоматизировать поиск оптимальных комбинаций параметров в целях повышения равномерности разбрасывания удобрений. По результатам оптимизации параметров разбрасывателя на основании построенной модели установлено, что оптимальное значение высоты установки диска  $H = 0,444$  м, угол установки лопасти по отношению к радиусу диска должен составлять примерно  $\psi_0 = 57^\circ$ , расстояние от места падения частиц на диск до края диска должно быть не менее 20 % относительно радиуса диска.

Программный модуль позволяет осуществлять моделирование движения частицы по диску, свободное падение частиц удобрений после схода с диска. В результате можно получить теоретические кривые распределения точек падения частиц на поверхность поля при поступательном движении машины как с одним диском, так и с двумя, визуализировать плотность распределения удобрений с учетом случайных возмущений, а также подсчитывать интегральный показатель — неравномерность разбрасывания. Результаты можно использовать для оптимизации и выбора оптимальных конструктивных параметров дискового разбрасывателя удобрений.

#### Список цитируемых источников

1. Сельскохозяйственные машины. Практикум : учеб. пособие / Э. В. Заяц [и др.] ; под ред. Э. В. Зайца. — 3-е изд., доп. и испр. — Минск : ИВЦ Минфина, 2019. — 494 с.
2. Дисковый рабочий орган рассеивателя сыпучих материалов / А. И. Филиппов [и др.] // Современные технологии сельскохозяйственного производства : материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф., Гродно, 14 марта 2014 г. / Гродн. гос. аграр. ун-т. — Гродно, 2014. — С. 158—160.
3. Пешков, И. А. Моделирование в системе компьютерной алгебры Mathematica движения частиц удобрения по дисковому разбрасывателю / И. А. Пешков, О. Б. Цехан // Стохастическое и компьютерное моделирование систем и процессов : сб. науч. ст. / Гродн. гос. ун-т им. Я. Купалы. — Гродно : ГрГУ, 2011. — С. 146—150.
4. Филиппов, А. И. Распределитель сыпучих материалов / А. И. Филиппов, С. Н. Ладутько, В. Н. Салей // Современные технологии сельскохозяйственного производства : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / Гродн. гос. аграр. ун-т. — Гродно, 2011. — Ч. 1. — С. 176—177.

5. Филиппов, А. И. Двухдисковый рабочий орган разбрасывателя сыпучих материалов / А. И. Филиппов, Э. В. Заяц, П. Н. Бычек // Современные технологии сельскохозяйственного производства : материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф., Гродно, 7 июня 2013 г. / Гродн. гос. аграр. ун-т. — Гродно, 2013. — С. 159—161.
6. Лепешкин, Н. Д. Моделирование разбрасывания твердых минеральных удобрений на дисковом разбрасывателе / Н. Д. Лепешкин, А. И. Филиппов, Э. В. Заяц // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию со дня образования РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» (Минск, 18—20 окт. 2017 г.). — Минск : Беларус. навука, 2017. — С. 122—125.
7. Ладутько, С. Н. Машина для внесения минеральных удобрений / С. Н. Ладутько, А. И. Филиппов, Э. В. Заяц // Современные технологии сельскохозяйственного производства : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / Гродн. гос. аграр. ун-т. — Гродно, 2011. — Ч. 1. — С. 98—100.
8. Филиппов, А. И. Разбрасыватель сыпучих материалов для сельскохозяйственных машин / А. И. Филиппов, В. Н. Салей, Н. А. Филатова // Современные технологии сельскохозяйственного производства : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. / Гродн. гос. аграр. ун-т. — Гродно, 2010. — С. 211—212.
9. Филиппов, А. И. К исследованию центробежных рабочих органов для внесения удобрений / А. И. Филиппов, С. Н. Ладутько // Современные технологии сельскохозяйственного производства : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 т. / Гродн. гос. аграр. ун-т. — Гродно, 2010. — Т. 1. — С. 208.
10. Филиппов, А. И. К анализу работы разбрасывателя удобрений РДУ-1,5 / А. И. Филиппов, С. Н. Ладутько, Г. С. Цыбульский // Современные технологии сельскохозяйственного производства : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 т. / Гродн. гос. аграр. ун-т. — Гродно, 2010. — Т. 1. — С. 209—210.
11. Ладутько, С. Н. Рассеивающий диск для внесения гранулированных минеральных удобрений / С. Н. Ладутько, Э. В. Заяц, А. И. Филиппов // Современные технологии сельскохозяйственного производства : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 т. / Гродн. гос. аграр. ун-т. — Гродно, 2010. — Т. 1. — С. 124—126.
12. Добышев, А. С. К анализу работы разбрасывателя удобрений РДУ-1,5 / А. С. Добышев, С. Н. Ладутько, А. И. Филиппов // Вестн. БГСХА. — 2010. — № 1. — С. 189—193.
13. Филиппов, А. И. К анализу работы центробежного разбрасывателя удобрений / А. И. Филиппов, С. Н. Ладутько // Современные технологии сельскохозяйственного производства : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. / Гродн. гос. аграр. ун-т. — Гродно, 2008. — С. 39—40.
14. Модернизация туковысевающего аппарата для ленточного внесения удобрений / А. И. Филиппов [и др.] // Сб. науч. ст. по материалам XXIII Междунар. науч.-практ. конф. — Гродно : ГГАУ, 2020. — С. 172—175.
15. Оборудование для дозирования и ленточного внесения удобрений к универсальному агрегату АУ-М1 / А. И. Филиппов [и др.] // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2020. — Вып. 8. — С. 119—127.
16. Филиппов, А. И. Математическое моделирование разбрасывания твердых минеральных удобрений / А. И. Филиппов, Э. В. Заяц, Н. Д. Лепешкин // Современные технологии сельскохозяйственного производства : сб. науч. ст. по материалам XXI Междунар. науч.-практ. конф., Гродно, 31 мая 2018 г. — Гродно : ГГАУ, 2018. — С. 251—254.

Поступила в редакцию 09.09.2021.

## ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Научная концепция журнала предполагает публикацию современных достижений в области технических наук; представление результатов фундаментальных и прикладных исследований, а также результатов, полученных в производственных условиях областей, включая результаты национальных и международных исследований. Статьи аспирантов, докторантов и соискателей последнего года обучения публикуются вне очереди при условии их полного соответствия требованиям, предъявляемым к научным публикациям.*

*Публикация статей в журнале бесплатная на основании заключённого договора о передаче исключительных прав на объект авторского права (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).*

*Статьи принимаются на русском, белорусском и английском языках.*

*Подробные правила для авторов представлены на официальном сайте БарГУ (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).*

## INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

*The scientific strategy of the journal suggests publishing modern achievements in the fields of Engineering sciences; presentation of the results of fundamental and applied research, as well as the results obtained under production conditions, both at the domestic and international level. Articles by postgraduate and doctoral students in their final year of traineeship are published out of turn if they are written in strict conformity with the specified requirements.*

*Publication of articles is free of charge in accordance with the existing contract on transfer of authority to the subject matter of copyright (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).*

*Articles can be written in the Russian, Belarusian or English languages.*

*More detailed instructions for authors can be found on the official website of BarSU (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).*