

ISSN 2309-1339



ВЕСТНИК БАРГУ

BARSU HERALD

СЕРИЯ  
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

SERIES  
ENGINEERING



№ 2 (12) 2022

# Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года  
Выходит 2 раза в год

№ 2 (12), ноябрь, 2022

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования  
«Барановичский государственный университет».

**Адрес редакции:**

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

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

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

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

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

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

Подписано в печать 27.10.2022. Формат 60 × 84 1/8.  
Бумага ксероксная. Печать цифровая.  
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 14,00. Уч.-изд. л. 9,00.  
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 (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь; учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

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

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

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

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

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

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

**Клочков А. В.**, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь); **Клубович В. В.**, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Сиваченко Л. А.**, доктор технических наук, профессор (межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», Могилев, Республика Беларусь); **Томило В. А.**, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь); **Шелег В. К.**, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь).

Promoter: Educational Institution  
"Baranovichi State University".

*Editorial address:*

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

Subscription indices: 00999 — for individual subscribers;  
009992 — for companies.

The certificate of the registration of mass media № 1533  
of 30.07.2012 issued by the Ministry of Information  
of Belarus.

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

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

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

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

Signed print 27.10.2022. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.  
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 14,00.  
Acc.-pub. s. l. 9,00. 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 Str., 231800 Slonim,  
Grodno region.

**EDITORIAL BOARD**

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

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

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

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

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

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

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

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

**Горавский И. А., Жигалов А. Н., Винничек К. С.** Технология и режимы аэродинамического звукового воздействия на осевой фрезерный инструмент из быстрорежущих сталей

**Кебец А. В., Кривонос Ю. И., Бучик Т. Ю., Паранин С. Н., Спирин А. В.** Исследование модельных индукторных систем на основе волокнистого нанокompозита мелкодисперсного сплава медь-ниобий

**Малеронко В. В., Алифанов А. В., Милукова А. М., Богданович И. А.** Моделирование процесса магнитно-импульсной обработки с предварительным нагревом осевого режущего инструмента

**Милукова А. М., Алифанов А. В., Матяс А. Н., Толкачева О. А.** Исследование физико-механических свойств ножей из стали 30X13 после магнитно-импульсной обработки

**Патапаў У. А., Русан С. І., Сівачэнка Л. А.** Камбінаваны метады сілавага аналізу прываднага механізма ланцужнага аграгата

**Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Корольков А. С.** Исследование влияния величины пробега легкового транспортного средства на плотность и температуру вспышки в открытом тигле моторных масел «Лукойл Люкс 5W-40» и «Нафтан Премьер 5W-40»

**Шматов А. А.** Многомерная оптимизация термогидрохимической обработки твердого сплава в гидрозолье оксидов цинка и молибдена

## ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

**Голубев В. С., Вегера И. И., Ходюш В. Е., Дробышевский П. С.** Наплавка износостойких слоев на рабочие кромки противорезущих брусьев кормоуборочных комбайнов

**Груданов В. Я., Ткачёва Л. Т., Белохвостов Г. И., Кунаш М. В.** Новые направления в конструировании глушителей шума поршневых двигателей внутреннего сгорания

**Китун А. В., Швед И. М., Бондарев С. Н., Скорб И. И.** Оптимизация выбора оборудования для удаления навоза механическими стационарными средствами на животноводческих фермах и комплексах

**Крупенин П. Ю., Крупенин Ю. А.** Диагностирование доильной установки в переходных режимах работы

**Михайлов К. М., Михайлов М. И.** Влияние расположения ножей режущего барабана кормоуборочного комбайна на параметры его образующей

## MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

**4 Goravskii I. A., Jigalov A. N., Vinnichak K. S.** Technology and modes of aerodynamic sound impact on axial milling tools made of high-speed steels

**16 Kebets A. V., Krivonos Y. I., Buchik T. Y., Paraniin S. N., Spirin A. V.** Study of model inductor systems based on a fibrous nanocomposite of a finely dispersed copper-niobium alloy

**24 Maleronok V. V., Alifanov A. V., Miliukova A. M., Bogdanovich I. A.** Magnetic-pulsed process modeling with the axial cutting tool preheating

**30 Miliukova A. M., Alifanov A. V., Matsias A. N., Tolkachova O. A.** Study of physical and mechanical properties of knives made of 30X13 steel after magnetic pulse treatment

**36 Potapov V. A., Rusan S. I., Sivachenko L. A.** Combined method of force analysis of the chain unit drive mechanism

**47 Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Korolkov A. S.** The study of the influence of the mileage of a passenger vehicle on the density and flash point in an open crucible of Lukoil Lux 5W-40 and Naphthan Premier 5W-40 motor oils

**53 Shmatov A. A.** Multidimensional optimization of hard alloy thermo-hydrochemical treatment in zinc and molybdenum oxides hydrosol

## PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

**65 Golubev V. S., Vegera I. I., Khodziush U. E., Drobyshevsky P. S.** Surfacing of wear-resistant layers on the working edges of anti-cutting bars of forage harvesters

**74 Grudanov V. Ya., Tkacheva L. T., Belokhvostov G. I., Kunash M. V.** New directions in the noise mufflers design of reciprocating internal combustion engines

**85 Kitun A. V., Shved I. M., Bondarev S. N., Skorb I. I.** Optimization of the equipment selection for manure removal by mechanical stationary means on livestock farms and complexes

**94 Krupenin P. Y., Krupenin Y. A.** Diagnosis of the milking machine in transient operation modes

**100 Mikhailov K. M., Mikhailov M. I.** Influence of the cutting drum knives position of a forage harvester on the parameters of its generator

УДК 621.9

**И. А. Горавский<sup>1</sup>,**

**А. Н. Жигалов<sup>1,2</sup>,** доктор технических наук, доцент, **К. С. Винничек<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,  
225404 Барановичи, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов  
Национальной академии наук Беларуси», ул. Бялыницкого-Бирули, 11, 212030 Могилев,  
Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

**ТЕХНОЛОГИЯ И РЕЖИМЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО  
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОСЕВОЙ ФРЕЗЕРНЫЙ ИНСТРУМЕНТ  
ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ**

Объяснен процесс образования эффекта упрочнения при использовании аэродинамической звуковой установки, экспериментально определена температура хладноломкости для быстрорежущих сталей трех марок, приблизительно равная 280 °С. Исследована зависимость частотно-амплитудных характеристик от длины выходного канала установки и давления подаваемого воздуха. Предложена технология и режимы обработки осевого фрезерного инструмента из быстрорежущих сталей для достижения максимальной стойкости при использовании инструмента с ударными нагрузками за счет аэродинамического звукового воздействия: температура предварительного нагрева — 280 °С; время упрочнения — 3 мин; использование последовательно режима 1 и режима 2 работы установки для аэродинамического звукового воздействия, что позволяет обеспечивать повышение времени работы концевых фрез из быстрорежущих сталей в 1,55 раза, что является весьма эффективным для данного вида инструмента.

**Ключевые слова:** метод аэродинамического звукового упрочнения; инструмент из быстрорежущих сталей; стойкость; режимы обработки.

Рис. 9. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

**I. A. Goravskii<sup>1</sup>,**

**A. N. Jigalov<sup>1,2</sup>,** DSc in Technical Sciences, Associate Professor, **K. S. Vinnichak<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Educational Institution “Baranovichi State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus

<sup>2</sup> State scientific institution “Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus”,  
11 Byalynitskogo-Biruli Str., 212030 Mogilev, the Republic of Belarus, + 375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

**TECHNOLOGY AND MODES OF AERODYNAMIC SOUND IMPACT  
ON AXIAL MILLING TOOLS MADE OF HIGH-SPEED STEELS**

The process of the hardening effect formation when using an aerodynamic sound installation is explained, the temperature of cold brittleness for high-speed steels of three grades, approximately equal to 280 °C, is experimentally determined. The dependence of the frequency-amplitude characteristics on the outlet channel length of the installation and the pressure of the supplied air is studied. A technology and processing modes for axial milling tool made of high-speed steels are proposed to achieve maximum tool life when using a tool with shock loads, due to aerodynamic sound effects: preheating temperature 280 °C; hardening time 3 min; the use of successively mode 1 and mode 2 of the installation for aerodynamic sound exposure, which makes it possible to increase the operating time of end mills made of high-speed steels by 1.55 times, which is very effective for this type of tool.

**Key words:** aerodynamic sound hardening method; tools made of high-speed steels; durability; processing modes.

Fig. 9. Table. 1. Ref.: 10 titles.

**Введение.** Обработка быстрорежущих сталей аэродинамическим звуковым методом, основанным на высокоэнергетическом низкотемпературном воздействии энергии, созданной резонансными акустическими волнами в звуковом спектре частот, обеспечивает устранение погрешности структуры в виде строчечности ориентированных вдоль оси деформации карбидных фаз из-за снижения структурной анизотропии, фазового наклепа, происходящих за счет релаксации структурных напряжений, плотности дислокаций, уменьшает размеры первичных карбидов с 7...15 до 3...8 мкм и сокращает их количество в 1,6 раза, что значительно улучшает однородность структуры быстрорежущих сталей [1], в связи с чем изучение метода аэродинамического звукового воздействия представляется весьма перспективным и актуальным.

**Материалы и методы исследования.** Метод аэродинамического звукового воздействия разработан доктором технических наук А. Н. Жигаловым [2; 3].

Принципиальные особенности процесса такого метода можно объяснить на следующей схеме установки для аэродинамического звукового воздействия (рисунок 1). Установка является разновидностью объёмного резонатора, представляет собой замкнутый прямоугольный контур, где параллельные более длинные стороны выполнены из металлических листов, способных по своим параметрам осуществлять колебательные движения, в отличие от боковых сторон, выполненных более жесткими.

В таком контуре возникают собственные синусоидальные волновые акустические колебания. Возбуждающиеся акустические волны внутри контура, распространяющиеся между колеблющимися стенками, через определенный частотный интервал образуют резонансные пики [3]. Установка выполняется в виде замкнутого прямоугольного контура с линейными размерами между колеблющимися стенками, причем параллельные более длинные стороны прямоугольника изготавливаются из металлических листов, способных по своим параметрам осуществлять колебательные движения, в отличие от боковых сторон и нижнего основания, не подверженных колебаниям. Возбуждающиеся акустические волны внутри контура устройства, распространяющиеся между колеблющимися стенками, образуют резонансные амплитудные пики.

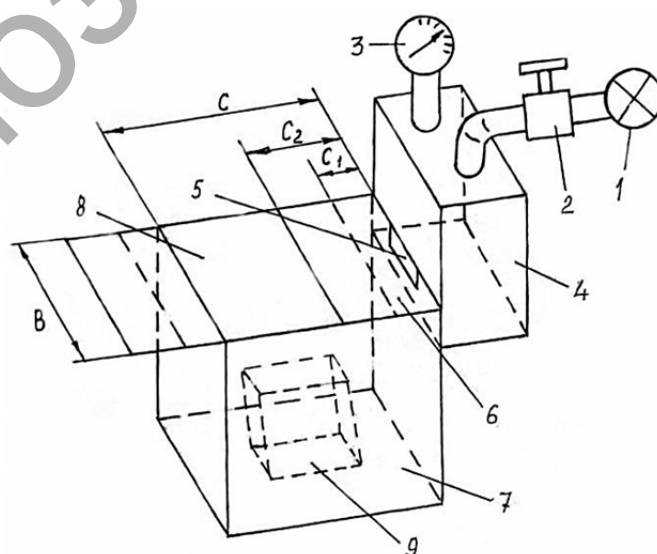


Рисунок 1. — Схема установки для аэродинамического звукового воздействия

Установка работает следующим образом. Камеру сглаживания пульсаций воздуха 4 подключают к сети генерации воздуха 1 через регулирующий вентиль 2. Изделия 9 помещаются в резонансную камеру 7 через выходной канал 6. Настройка установки на необходимый режим осуществляется посредством перемещения регулирующей заслонки 8 на размер  $C_1$  или  $C_2$  с последующей фиксацией заслонки 8.

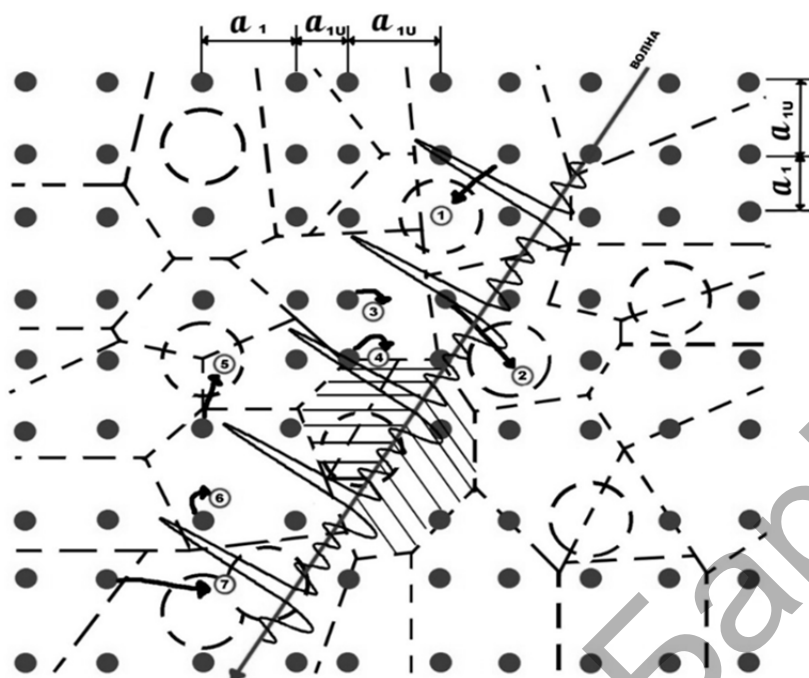
После этого осуществляют подачу воздуха в камеру сглаживания пульсаций воздуха 4 через регулирующий вентиль системы 2 от источника генерации воздуха 1. При этом в рабочую камеру 7 поступает заданный объем воздуха при соответствующем давлении, который контролируется при помощи манометра 3. Воздух, проходя через щелевое сопло 5 шириной 0,5...0,9 мм, образует давление и частоту звукового поля, которые обеспечивают входение в резонанс боковых стенок резонансной камеры 7.

Резонанс в установке воздействия возникает от следующих комбинаций действий [3]. Через щелевое сопло 5 часть воздуха уходит наружу, а часть воздуха нагнетается в полость резонансной камеры 7, что происходит за счет рассекания воздушного потока клиновидной частью регулирующей заслонки 8. Внутренний объем воздуха, находящегося в резонансной камере, зависит от положения регулирующей заслонки. При нагнетании в резонансную камеру воздуха давление в резонансной камере возрастает. Когда величина повышенного давления в камере превысит давление потока воздуха, поступающего из щелевого сопла, то повышенное давление заставляет воздух вытекать обратно из резонансной камеры. При выравнивании давлений внутри и снаружи воздух всё равно продолжит выходить наружу, поскольку поток воздуха, выходящий из резонансной камеры, обладает массой и скоростью, а значит, и кинетической энергией. Через некоторый промежуток времени воздух выйдет из резонансной камеры, при этом давление внутри резонансной камеры станет меньше, чем давление от воздушного потока, выходящего из щелевого сопла. Воздух снова устремится в резонансную камеру. Такие циклы будут повторяться неоднократно. При этом возникает явление резонанса Гельмгольца: стенки резонансной камеры под действием цикличности давления воздуха при совпадении частот колебаний воздуха в резонансной камере и снаружи камеры также начинают вибрировать с резонансной частотой [4; 5]. Так как внешняя сила воздушного потока, идущего от щелевого сопла наружу, возникает и исчезает с частотой, равной собственной частоте воздушного потока в полости резонансной камеры, то явление резонанса будет постоянно.

Процесс образования эффектов при аэродинамическом звуковом воздействии можно объяснить следующим образом [4]. При изготовлении сплавов под воздействием градиента (деформационного, температурного, силового и др.), а также с учетом неоднородности его распределения по объему материала и времени воздействия возникают дефекты кристаллического строения за счет нарушения в периодичности расположения атомов в кристаллической решетке, перемещения их в междоузлия и образования увеличенной концентрации вакансий, что вызывает напряжения в решетке и увеличение плотности дислокаций. Поэтому твердые сплавы имеют большое количество пор, образованных вакансионным пересыщением кристаллической решетки (рисунок 2).

Атомы, смещенные при изготовлении со своего положения, в котором находится вакансия, с одной стороны, имеют менее напряженное состояние из-за энтропийного рассеивания части своей внутренней энергии при перемещении в другое место, с другой — в новом положении на смещенные атомы воздействует большее количество сил от соседних атомов в связи с тем, что смещенные атомы заземлены в междоузлиях. Смещенные атомы, перемещение которых способствовало образованию дефектов и дислокаций, находятся в более неравновесном состоянии относительно несмещенных атомов.

При этом все атомы кристаллических решеток хотя и постоянно колеблются вокруг своих осей, но находятся в состоянии термодинамического равновесия. После нагрева твердых сплавов до температуры хладнотойкости увеличиваются колебания атомов кристаллической решетки и их запасенная потенциальная энергия.



● — положение атома до аэродинамического звукового воздействия ; ○ — положение атома после аэродинамического звукового воздействия; ◐ — вакансия; ⊙ — агломерат;  $a_1$  — межатомное расстояние до энергетического воздействия;  $a_{1U}$  — межатомное расстояние после энергетического воздействия

**Рисунок 2. — Схема воздействия резонансных волн на кристаллическую решетку при аэродинамическом звуковом воздействии**

Под действием последующего энергетического импульса энергии от воздействия резонансных звуковых волн, а также с учетом структуры звуковой волны, имеющей синусоидальный характер и действующей на твердое тело расклинивающим образом, происходит выбивание смещенных при изготовлении атомов из междоузлий, являющихся наиболее диффузионно подвижными, расположенных вблизи вакансий и имеющих наименьшее влияние потенциального барьера, созданного соседними атомами кристаллической решетки.

Выбитые атомы переходят на место существующих вакансий (на рисунке 2 показаны сплошной окружностью с цифрой внутри) и занимают упорядоченное положение в решетке из-за своей низкой энергии, рассеянной при перемещении, и действием сил межатомных связей соседних атомов. В результате происходит рекомбинация разноименных дефектов (взаимное исчезновение как вакансии, так и межузельного атома) и восстановление узла кристаллической решетки, ее релаксация, аннигиляция дислокаций.

Известно [4], что для установок аэродинамического звукового воздействия резонансная частота  $\omega_{рез}$  определяется по формуле

$$\omega_{рез} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{B_{щ} H_{щ}}{(L_p - L_3) B_p H_p L_{щ}}}, \tag{1}$$

где  $c$  — скорость звука;  
 $B_{щ}$  — высота щелевого сопла;  
 $H_{щ}$  — толщина щелевого сопла;

- $L_p$  — длина рабочей части резонансной камеры;  
 $L_3$  — длина выходного канала при заданном положении заслонки;  
 $B_p$  — ширина рабочей части резонансной камеры;  
 $H_p$  — высота рабочей части резонансной камеры;  
 $L_{щ}$  — длина щелевого сопла.

С учетом формулы (1), регламентирующей соотношение ряда конструкторских размеров, была разработана и изготовлена установка для аэродинамического звукового воздействия со следующими размерами:  $B_{щ} = 0,0007$  м;  $H_{щ} = 0,0013$  м;  $L_p = 0,315$  м;  $B_p = 0,09$  м;  $H_p = 0,29$  м;  $L_{щ} = 0,09$  м (рисунок 3).

Разработанная установка позволяет генерировать энергию за счет приведения волн звуковой частоты в резонансное состояние, что обеспечивает рекомбинацию разноименных дефектов и восстановление узла кристаллической решетки, релаксацию структуры и аннигиляцию дислокаций.

Эффективность процесса аэродинамического звукового упрочнения реализуется через повышенный ресурс работы упрочненного инструмента. Осевой фрезерный инструмент, используемый при процессах прерывистого резания, должен обладать как можно более высокой твердостью и ударной вязкостью.

Для запуска процесса аэродинамического звукового воздействия необходимо предварительно нагреть упрочняемое изделие до некоторой температуры, причем чем выше температура нагрева, тем более эффективнее будут происходить релаксационные изменения в изделии. Однако известно, что при нагреве быстрорежущих сталей происходит их структурный отпуск, в связи с чем необходимо установить такой режим температурного нагрева, при котором будут происходить максимальные релаксационные изменения в изделии и одновременно изделие не потеряет свою исходную твердость. Такая температура соответствует нижнему порогу температуры хладноломкости [4; 6].

Аналитический расчет температуры хладноломкости весьма сложен. В связи с этим представляется целесообразным определить величину температуры хладноломкости экспериментальным образом для конкретных инструментальных материалов из быстрорежущих сталей. Экспериментальное определение температуры хладноломкости определялось путем нагрева различных образцов из быстрорежущих сталей в диапазоне температур 100...500 °С, после чего на твердомере ММП ИТМ на каждом образце определялась средняя величина твердости. Результаты исследований приведены на рисунке 4.



Рисунок 3. — Установка для аэродинамического звукового воздействия

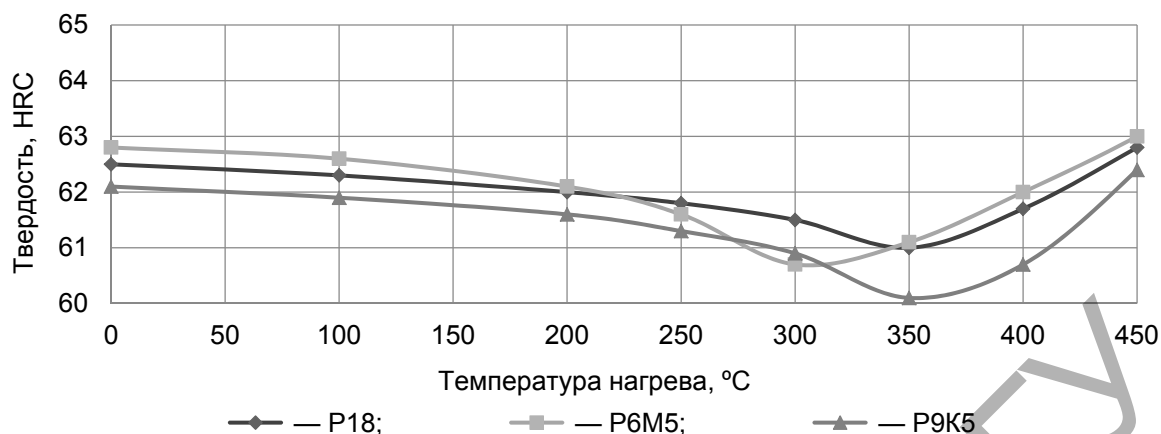


Рисунок 4. — Влияние температуры нагрева на твердость быстрорежущих сталей

Экспериментальные результаты исследований показывают, что температура хладноломкости для быстрорежущих сталей ориентировочно равна 280 °С. При таких температурах нагрева в быстрорежущих сталях будут происходить максимальные структурные релаксационные изменения и одновременно не произойдет снижение исходной твердости. Следовательно, при аэродинамическом звуковом воздействии на осевой фрезерный инструмент из быстрорежущих сталей необходимо осуществлять предварительный нагрев инструмента до температуры хладноломкости быстрорежущих сталей, равной 280 °С.

Для достижения повышенного уровня ресурса инструмента из быстрорежущих сталей необходимо определить для установки аэродинамического звукового воздействия значения частот и амплитуд, при которых возникают резонансные эффекты.

Создание такого рода амплитудно-частотных характеристик обуславливается управляющими параметрами процесса аэродинамического звукового воздействия, к которым относятся величина поступающего в резонансную камеру объема и давления воздуха, а также длина выходного канала при заданном положении заслонки.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Проведены исследования влияния длины выходного канала установки и давления подаваемого воздуха на создаваемые частотно-амплитудные характеристики, для чего в центре вибрирующих стенок установки виброанализатором сигналов СД-21 замерялись спектры виброперемещений (в мкм). Экспериментально установлено, что для разработанной установки для аэродинамического звукового воздействия резонансные эффекты возникают на частоте 154 Гц при амплитуде 130 мкм (рисунок 5) и на частоте 168 Гц при амплитуде 66 мкм.

Если произвести расчет резонансных частот по формуле (1) при длине выходного канала установки для АДУ  $L_3 = 0,085$  м, то расчетная величина резонансной частоты  $\omega_p = 153,8$  Гц, а при  $L_3 = 0,12$  м  $\omega_p = 167,1$  Гц. Разница расчетных данных от экспериментальных составляет 0,1...0,5 %, что позволяет сделать вывод о достаточно хорошем уровне сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Проведены экспериментальные исследования влияния давления поступающего в камеру воздуха на резонансную амплитуду колебания стенок установки, результаты которых (рисунок 6, а) показывают, что резонансные частоты и амплитуды возникают при давлении подающего воздуха, равном 0,16 МПа.

Проведены экспериментальные исследования при давлении воздуха 0,16 МПа влияния длины выходного канала установки для аэродинамического звукового воздействия на амплитудно-частотный коэффициент  $K_{ачх} = \omega_{max} A_{max}$  (произведение частоты и амплитуды). Из полученных кривых (см. рисунок 6, б) видно, что резонансные частоты и амплитуды возникают при длинах выходного канала установки для аэродинамического звукового воздействия, равных 85 и 130 мм.

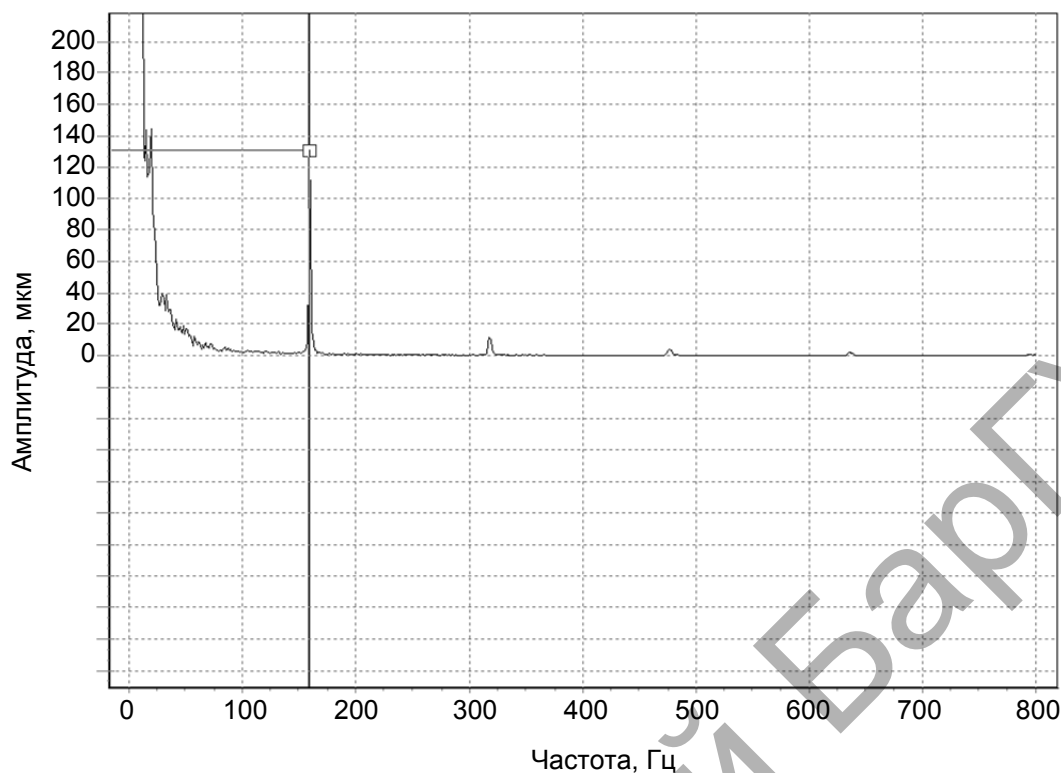


Рисунок 5. — Зависимости амплитудных виброперемещений от частоты на режиме 1

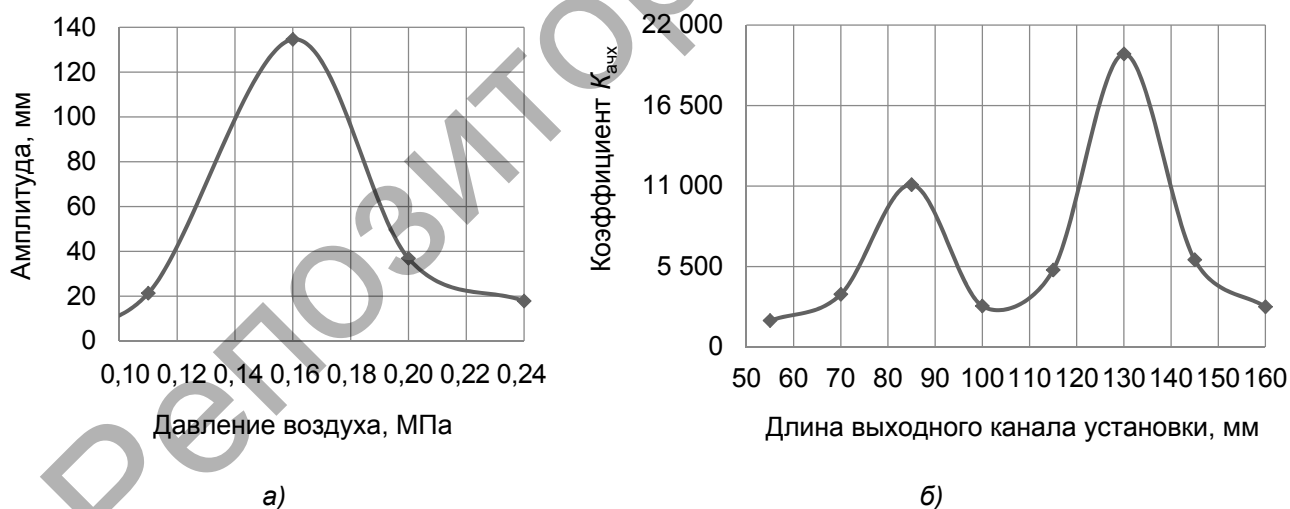


Рисунок 6. — Зависимости амплитуды от давления подаваемого воздуха (а) и частотно-амплитудных характеристик от длины выходного канала при заданном положении заслонки (б)

Таким образом, установлено, что для разработанной установки для аэродинамического звукового воздействия существуют два режима обработки, на которых возникают резонансные эффекты: режим 1 — создается амплитуда 130 мкм на частоте 154 Гц при размере длины выходного канала камеры 130 мм и давлении воздуха 0,16 МПа; режим 2 — создается амплитуда 66 мкм на частоте 168 Гц при размере длины выходного канала камеры 85 мм и давлении воздуха 0,16 МПа.

Объем подаваемого воздуха  $Q_{\text{во}}$  в резонансную камеру установки для аэродинамического звукового воздействия зависит от подающего давления и длины выходного канала камеры и определяется по формуле [4]

$$Q_{\text{во}} = 60 \sqrt{\frac{2P_{\text{в}}}{\rho_{\text{во}}}} S_{\text{с}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{в}}$  — давление подаваемого воздуха;  
 $\rho_{\text{во}}$  — плотность воздуха;  
 $S_{\text{с}}$  — площадь сечения щелевого сопла.

Тогда, согласно (2), для разработанной установки аэродинамического звукового воздействия при давлении подаваемого воздуха  $P_{\text{в}} = 0,16$  МПа, плотности воздуха  $\rho_{\text{во}} = 1,2041$  кг / м<sup>3</sup> и площади сечения щелевого сопла  $S_{\text{с}} = 0,000063$  м<sup>2</sup> объем подаваемого воздуха в резонансную камеру  $Q_{\text{во}} = 2,0$  м<sup>3</sup> / мин. Данные значения давления подаваемого воздуха (0,16 МПа) и объема подаваемого воздуха в резонансную камеру (2,0 м<sup>3</sup> / мин) следует учитывать при подборе компрессора.

Для исследования влияния воздействия аэродинамического звукового метода на износ фрез были обработаны аэродинамическим звуковым воздействием две фрезы из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром Ø12 мм, имеющие пять режущих зубьев, на режимах: предварительный нагрев — до 260 °С, выдержка в нагревательной печи — 60 мин [7]. После этого такими фрезами, а также фрезой без воздействия аэродинамическим звуковым методом производили фрезерование образцов 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 — 64 мм / мин, ширина фрезерования — 6 мм. По истечении каждых 10...15 мин обработки измеряли величину износа по задней поверхности  $h_z$  с помощью электронного микроскопа Galileomicroscan HV1AC. Результаты исследований представлены на рисунке 7.

Из графиков следует, что обработка аэродинамическим звуковым методом позволяет увеличить время работы концевых фрез Р6М5 между переточками на указанных режимах резания в 1,55 раза, что является весьма эффективным для данного вида инструмента.

Для повышения эффективности аэродинамического звукового воздействия на быстрорежущие стали необходимо установить оптимальное время воздействия и режимы обработки. Аналитическим расчетом определить такие параметры является весьма сложной задачей. В связи с этим представляется целесообразным провести исследования посредством эксперимента [8; 9].

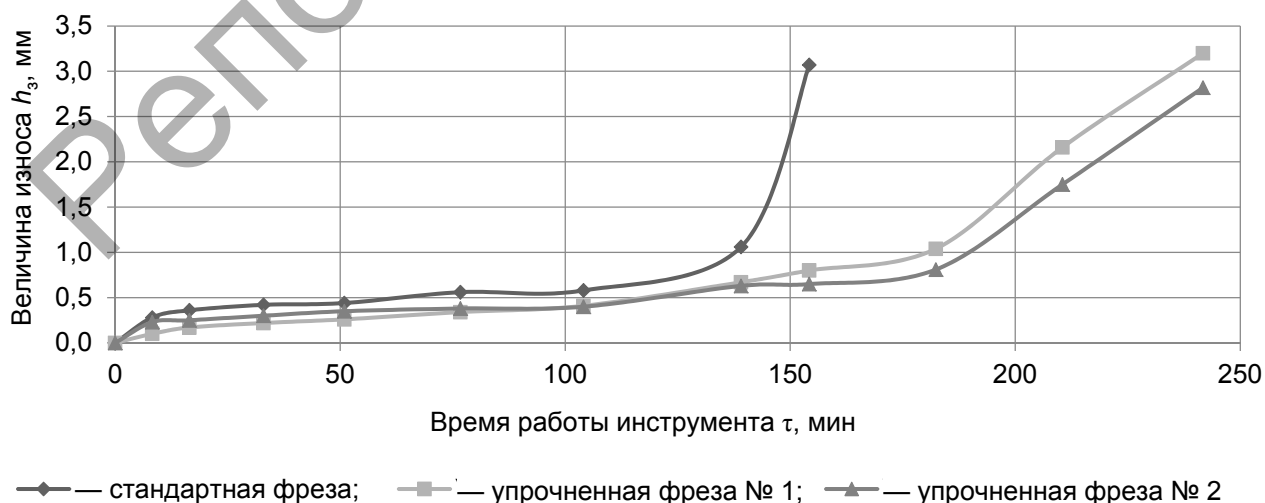


Рисунок 7. — Зависимости величины износа по задней поверхности фрез, обработанных аэродинамическим звуковым методом

Упрочнение концевых фрез из быстрорежущей стали Р6М5 осуществлялось по следующей технологии [8]. Производилось подключение экспериментальной установки для аэродинамического звукового воздействия (рисунок 8) к ресиверу компрессора AIRCAST 1 производительностью 1 680 л / мин через регулирующий вентиль 2. По три концевых фрезы из быстрорежущей стали Р6М5 Ø8,0 мм (ГОСТ 17025-71) закреплялись в поддерживающем устройстве, которое предварительно помещалось в термическую печь, разогретую до необходимой температуры, и выдерживались при такой температуре в течение 60 мин. После этого поддерживающее устройство с разогретыми концевыми фрезами перемещалось в рабочую камеру 7 через выходной канал 6. Регулирующая заслонка 8 устанавливалась на тот или иной размер, что соответствовало первому или второму режиму упрочнения, с последующей фиксацией заслонки. Затем осуществлялась подача воздуха в камеру сглаживания пульсации воздуха 4 через регулирующий вентиль 2 и трубопровод от ресивера компрессора. При этом в рабочей камере 7 давление попадающего воздуха выдерживалось в диапазоне 1,6 МПа, которое контролировалось при помощи стрелочного манометра 3 и регулировалось с помощью вентиля 2. При таком условии подачи воздуха в резонансной камере возникало звуковое давление, которое на определенных частотах звукового поля (168 или 154 Гц) образовывало резонансные амплитуды колебаний акустических волн.

Время звуковой обработки составило от 2,0 до 4,0 мин. После осуществления всех циклов упрочнения осуществлялся процесс старения, для чего упрочненные концевые фрезы помещались в термопечь, разогретую до температуры 160 °С, и выдерживались при такой температуре в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе до полного остывания.

Матрица режимов упрочнения при аэродинамическом звуковом воздействии для фрез из быстрорежущей стали Р6М5 Ø8,0 мм представлена в таблице 1. Режимы упрочнения устанавливались по методике [10].

За критерий эффективности упрочнения при аэродинамическом звуковом воздействии принимался износ по задней поверхности. Для этого тремя фрезами из быстрорежущей стали Р6М5 (упрочненными на одном режиме) проводилась обработка образцов из стали 45 по ГОСТ 1050 твердостью 187...207 НВ [3; 6].

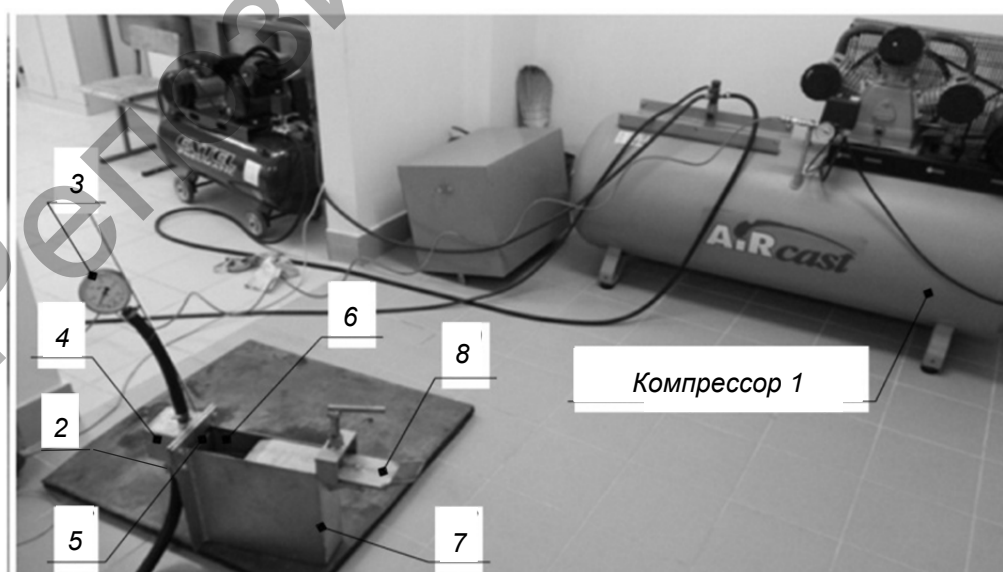


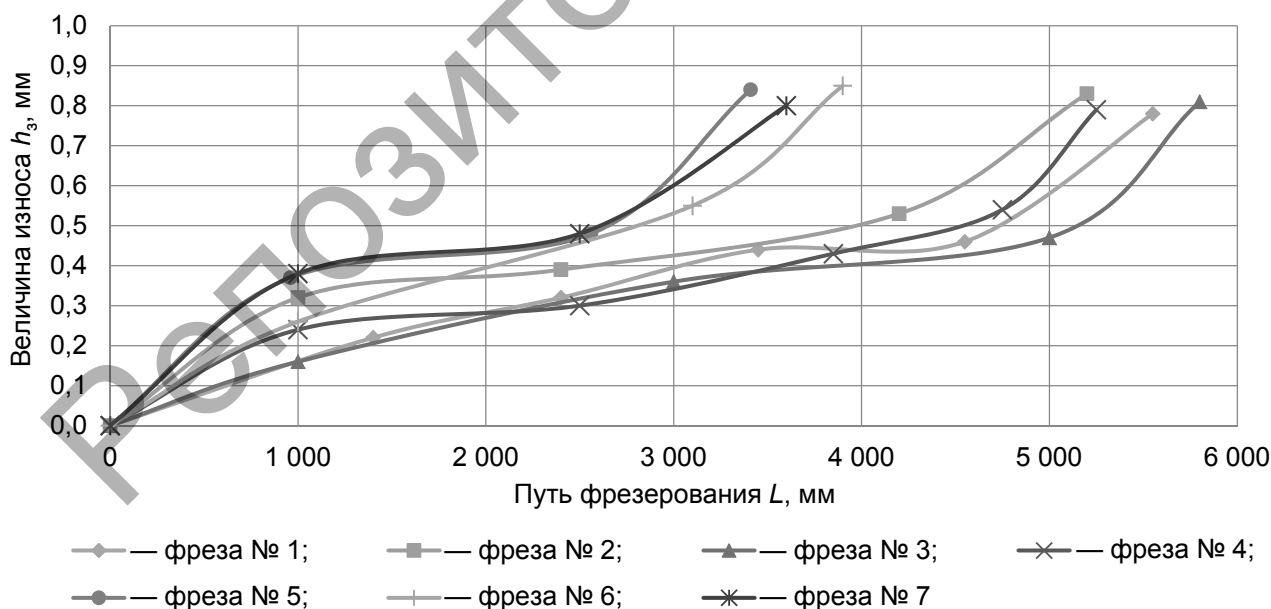
Рисунок 8. — Общий вид оборудования для проведения эксперимента

Т а б л и ц а 1. — Матрица режимов обработки при аэродинамическом звуковом воздействии для фрез  $\varnothing 8,0$  мм из быстрорежущей стали Р6М5

Номер опыта	Температура нагрева $T$ , °С	Время упрочнения $\tau$ , мин	Режим обработки
1	280	3,0	1
2	260	3,0	1 и 2
3	280	3,0	1 и 2
4	280	3,0	2
5	280	2,0	1 и 2
6	280	4,0	1 и 2
7	300	3,0	1 и 2

Фрезерование осуществлялось на фрезерном станке модели 675 при следующих режимах резания: скорость резания — 15,83 м / мин, подача на зуб — 0,0334 мм / зуб, глубина резания — 1,3 мм. Ширина фрезерования составляла 5 мм. По истечении каждых 1 000...1 500 мм пройденного пути фрезерования производились измерения величины износа по задней поверхности  $h_3$  на электронном микроскопе Galileomicroscan HV1AC, по средним значениям строились графики зависимости величины износа по задней поверхности от пути фрезерования для каждого режима упрочнения. Результаты износа зубьев фрез по задней поверхности  $h_3$  от пути фрезерования представлены на рисунке 9.

Как видно из рисунка 9, наименьший износ, а значит, и наибольшую стойкость показывают упрочненные аэродинамическим звуковым методом концевые фрезы из быстрорежущей стали Р6М5  $\varnothing 8,0$  мм из партии № 3 на режимах: температура предварительного нагрева — 280 °С, время упрочнения — 3 мин, режимы 1 и 2 работы установки.



1 —  $T = 280$  °С,  $\tau = 3,0$  мин, режим 1; 2 —  $T = 260$  °С,  $\tau = 3,0$  мин, режимы 1 и 2; 3 —  $T = 280$  °С,  $\tau = 3,0$  мин, режимы 1 и 2; 4 —  $T = 280$  °С,  $\tau = 3,0$  мин, режим 2; 5 —  $T = 280$  °С,  $\tau = 2,0$  мин, режимы 1 и 2; 6 —  $T = 280$  °С,  $\tau = 4,0$  мин, режимы 1 и 2; 7 —  $T = 300$  °С,  $\tau = 3,0$  мин, режимы 1 и 2

Рисунок 9. — Зависимости износа зубьев фрез, упрочненных в соответствии с номером опыта 1—7, по задней поверхности  $h_3$  от пути фрезерования при разных опытах

Таким образом, проведенные исследования износа фрез из быстрорежущей стали Р6М5 Ø8,0 мм, обработанных аэродинамическим звуковым воздействием на различных режимах, показали, что наибольшая стойкость инструмента обеспечивается при обработке аэродинамическим звуковым воздействием на следующих параметрах: температура предварительного нагрева — 280 °С, время упрочнения — 3 мин, использование последовательно режимов 1 и 2 работы установки.

**Заключение.** Разработана и изготовлена установка для аэродинамического звукового воздействия для обработки осевого фрезерного инструмента из быстрорежущих сталей, позволяющая генерировать энергию за счет приведения волн звуковой частоты в резонансное состояние, что обеспечивает рекомбинацию разноименных дефектов и восстановление узла кристаллической решетки, релаксацию структуры и аннигиляцию дислокаций.

Экспериментально установлено, что при аэродинамическом звуковом воздействии на осевой фрезерный инструмент из быстрорежущих сталей необходимо осуществлять предварительный нагрев инструмента до температуры хладноломкости быстрорежущих сталей, равной 280 °С, что позволит обеспечить максимальные структурные релаксационные изменения в материале и одновременно не произойдет снижение исходной твердости.

Установлено, что для разработанной установки для аэродинамического звукового воздействия существуют два режима обработки, на которых возникают резонансные эффекты: режим 1 — создается амплитуда 130 мкм на частоте 154 Гц при размере длины выходного канала камеры 130 мм и давлении воздуха 0,16 МПа; режим 2 — создается амплитуда 66 мкм на частоте 168 Гц при размере длины выходного канала камеры 85 мм и давлении воздуха 0,16 МПа.

Экспериментально установлено, что аэродинамическое звуковое воздействие позволяет увеличить время работы концевых фрез Р6М5 между переточками в 1,55 раза, что является весьма эффективным для данного вида инструмента.

Установлено, что наибольший эффект от аэродинамического звукового воздействия на осевой фрезерный инструмент обеспечивается на следующих режимах обработки: температура предварительного нагрева — 280 °С, время упрочнения — 3 мин, использование последовательно режимов 1 и 2 работы установки.

#### Список цитированных источников

1. Жигалов, А. Н. Экспериментальные исследования микроструктуры быстрорежущей стали Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2022. — № 1 (11). — С. 14—23.
2. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 21049 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Голловков ; дата опубл.: 30.06.2017.
3. 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.
4. Жигалов, А. Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.07 / А. Н. Жигалов. — Минск, 2021. — 382 л.
5. Helmholtz, H. On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music / H. Helmholtz. — London : Longmans, Green, and Co, 2010. — P. 44.
6. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. — М. : Металлургия, 1986. — 544 с.
7. Горавский, И. А. Исследование влияния аэродинамического звукового упрочнения на стойкость осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Наука — практике : материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 15 мая 2020 г. : в 2 ч. / Баранович. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи, 2020. — Ч. 1. — С. 102—104.
8. Горавский, И. А. Определение оптимальных параметров аэродинамического звукового упрочнения осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дей-

хина // Наука — практике : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., 13 мая 2021 г. : в 3 ч. / Баранович. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи, 2021. — Ч. 2. — С. 28—29.

9. Горавский, И. А. Методика проведения аэродинамического звукового упрочнения осевого инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Векторы инновационного развития : материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 11 дек. 2020 г. : в 2 ч. / Баранович. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи, 2020. — Ч. 1. — С. 64—66.

10. Жигалов, А. Н. Математическая модель и методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2019. — № 7. — С. 49—63.

Поступила в редакцию 09.09.2022.

Репозиторий БарГУ