



ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 2 2020

Учредитель журнала:

ЗАО «Солигорский Институт проблем
ресурсосбережения с Опытным
производством»

Научно-технический журнал

Издается с декабря 1998 г.
Выходит четыре раза в год

Редакция:

Главный редактор
Прушак Виктор Яковлевич

Заместитель главного редактора
Дворник Александр Петрович

Редакционная коллегия:

С.С. Андрейко (Россия), П.Н. Богданович (Беларусь), И.В. Войтов (Беларусь),
Ц. Вутов (Болгария), В.А. Губанов (Беларусь), М.А. Журавков (Беларусь),
Н.П. Крутько (Беларусь), Е.И. Марукович (Беларусь), Ф.И. Пантелеенко (Беларусь),
Б.И. Петровский (Беларусь), Н.Б. Рыспанов (Казахстан), С.В. Харитончик (Беларусь),
В.М. Шаповалов (Беларусь), В.К. Шелег (Беларусь), А.О. Шимановский (Беларусь)



Адрес редакции:

ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Минская обл., Республика Беларусь

Тел.: (+375 174) 28 21 07, факс: (+375 174) 26 28 37

E-mail: onti@sipr.by

Журнал включен в перечень научных изданий РБ для опубликования результатов диссертационных исследований по научным направлениям: технические науки (геотехнология, материаловедение, машиностроение)
Журнал включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

© ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

- Пузанов Д.А.** Исследование проявлений горного давления при подготовительных и очистных работах в лаве № 11-4 горизонта –620 м рудника 3 РУ, извлекающей списанные запасы сильвинитового слоя после его подработки 5
- Цыбуленко П.В., Оника С.Г.** Производство композитных топливных торфяных брикетов с использованием отходов льнопереработки 16

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Казаченко Г.В., Нагорский А.В., Басалай Г.А., Борис Е.В.** О потерях мощности при скольжении конвейерной ленты по поверхности барабана 21
- Богданович П.Н., Коднянко М.Ю., Стратанович В.А., Брундуков А.С.** Закономерности изнашивания уплотнений буровых насосов из полиуретана в углеводородной рабочей среде с абразивом 28
- Жигалов А.Н., Жолобов А.А., Телеш В.Г.** Эффективность аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента в условиях ОАО «Мозырский машиностроительный завод» 33
- Суторьма И.И.** Расчет полей давлений в полостях центробежных насосов 44
- Довгяло В.А., Моисеенко В.Л., Жигар В.И., Письменная Н.В.** Валидация имитационной модели звеносборочной линии КБ-03 51
- Зильберглейт М.А.** Производители валковых прессов для гранулирования (брикетирования). Обзор по Западной Европе 57
- Инютин В.И., Кожедуб С.С., Лапушкин А.С., Шаповалов В.М.** Исследование влияния динамической нагрузки на изменение размеров, статической жесткости и износостойкости материала напильных прокладок для деревянных шпал 64

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Казак Н.Н., Овчинников Е.В., Михайлов В.В., Чекан Н.М.** Коррозионностойкие нанокomпозиционные покрытия, получаемые методом электроискрового легирования 70
- Антонов А.С., Авдейчик С.В., Валюк А.Ю., Абдуразаков А.А.** Особенности структуры и параметров эксплуатационных характеристик композиционных материалов на основе термопластов 77
- Неверов А.С., Доценко Е.И., Лебедев М.В.** Исследование влияния связующего для древесно-стружечных плит на их физико-механические и теплоизоляционные характеристики 90
- Радюк А.Н., Козлова М.А., Буркин А.Н.** Оценка свойств композиционных материалов для подошв обуви на полимерной матрице из вторичного полиуретана.... 99

На обложке: машина погрузочная для подземного склада руды МП-5СР.
На 1-й и 3-й стр.: мобильная буровая установка МБУ-140.

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь
Свидетельство о государственной регистрации СМИ № 1000 от 12.01.2010 г.

Подписные индексы: 74933 (для индивидуальных подписчиков), 749332 (для организаций)

Ответственный секретарь А.В. Протасеня
Подписано в печать 03.06.2020 г. Формат 60×84¹/₈. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м².
Заказ 1648. Усл. печ. л. 12,82. Тираж 120 экз.
Отпечатано Минским областным унитарным предприятием «Слуцкая укрупненная типография»,
ул. М. Богдановича, 7, 223610, г. Слуцк, Минская область, Республика Беларусь.
ЛП № 02330/0494181 от 03.04.2009 г.

MINING MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

№ 2 2020

Founder of the Journal:

JSC “Soligorsk Institute of Resources
Saving Problems with Pilot Production”

Scientific and Technical Journal

Published since December, 1998

Issued four times a year

Edition:

Editor-in-Chief
Prushak Viktor Yakovlevich

Editor-in-Chief Deputy
Dvornik Aliaksander Petrovich

Editorial Board:

S.S. Andreiko (Russia), P.N. Bogdanovich (Belarus), I.V. Voitov (Belarus),
Tz. Voutov (Bulgaria), V.A. Gubanov (Belarus), M.A. Zhuravkov (Belarus),
N.P. Krutko (Belarus), Ye.I. Marukovich (Belarus), F.I. Panteleenko (Belarus),
B.I. Petrovsky (Belarus), N.B. Ryspanov (Kazakhstan), S.V. Kharitonchik (Belarus),
V.M. Shapovalov (Belarus), V.K. Sheleg (Belarus), A.O. Shimanovsky (Belarus)



Editorial Address:

69, Kozlova street, 223710, Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus

Tel: (+375 174) 28 21 07, Fax: (+375 174) 26 28 37

E-mail: onti@sipr.by

The journal is included in the list of scientific publications of the Republic of Belarus for publishing the results of dissertation studies on scientific directions: technical sciences (geotechnology, materials engineering, machine-building)
The journal is included in Russian Science Citation Index

© JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, 2020

CONTENTS

GEOTECHNOLOGY

- Puzanov D.A.** Research of rock pressure manifestations at the development and winning operations in longwall face no. 11-4 of the horizon – 620 m of the mine 3 RU, extracting written off silvinitic layer resources after its underworking 5
- Tsybulenka P.V., Onika S.G.** Manufacture of composite fuel peat briquettes using flax processing waste 16

MACHINE-BUILDING

- Kazachenko G.V., Nahorski A.V., Basalai R.A., Boris Ya.V.** Concerning power losses at slipping the conveyor belt on the drum surface 21
- Bogdanovich P.N., Kodnianska M.Yu., Stratanovich V.A., Brundukov A.S.** The regularities of wear of drilling pumps seals made of polyurethane in the hydrocarbon working environment with abrasive 28
- Jigalov A.N., Zholobov A.A., Telesh V.G.** Efficiency of aerodynamic sound strengthening of a carbide tool under the conditions of the OJSC “Mozyr machine-building plant” 33
- Sutarma I.I.** Calculation of pressure fields in caves of centrifugal pumps 44
- Dovgualo V.A., Moiseenko V.L., Zhigar V.I., Pismennaya N.V.** Validation of the simulation model of the link assembly line KB-03 51
- Zilbergleit M.A.** Manufacturers of roller presses for granulation (briquetting). Review of Western Europe 57
- Injutin V.I., Kozhedub S.S., Lapushkin A.S., Shapovalov V.M.** Study of the effect of dynamic load on change of sizes, static rigidity and wear resistance of materials of bird pads for wooden sleepers 64

MATERIALS ENGINEERING

- Kazak N.N., Auchynnika Ya.V., Mikhailov V.V., Chekan N.M.** Corrosion-proof and nanocomposite coatings obtained by the method of electric spark alloying 70
- Antonov A.S., Avdeychik S.V., Valiuk A.Ju., Abdurazakov A.A.** Features of the structure and performance parameters of composite materials based on thermoplastics 77
- Neverov A.S., Dotsenko E.I., Lebedev M.V.** Research of influence of a binder for chipboard on its physical-mechanical and thermal insulation characteristics 90
- Radyuk A.N., Kozlova M.A., Burkin A.N.** Evaluation of the properties of composite materials for shoe soles on a polymer matrix of recycled polyurethane 99
-
-

УДК 621.789:621.9.025.7(476)(045)

Жигалов А.Н.¹, Жолобов А.А.², Телеш В.Г.³¹УО «Барановичский государственный университет», г. Барановичи, Беларусь²Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь³ОАО «Мозырский машиностроительный завод», г. Мозырь, Беларусь**ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО
УПРОЧНЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА В УСЛОВИЯХ
ОАО «МОЗЫРСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД»**

Аннотация. Метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) существенно повышает стойкость металлорежущего твердосплавного инструмента, работающего с ударными нагрузками. Экспериментальные исследования износа твердосплавных пластин ВК8, упрочненных АДУ, показали, что при фрезеровании заготовок из чугуна АЧС4 происходит снижение их износа по сравнению с неупрочненными в 1,38...2,18 раза. Проведенные однофакторные и многофакторные исследования влияния режимов резания твердосплавных пластин ВК8, упрочненных АДУ, на износ при фрезеровании чугуна АЧС4 позволили получить эмпирические зависимости и создать технологическую базу. Результатом явилось внедрение метода АДУ в производственный процесс на ОАО «Мозырский машиностроительный завод» для упрочнения ножей 2021-0015 ВК8 ГОСТ 24359-80, предназначенных для обработки изделий, имеющих прерывистые поверхности, из чугуна АЧС4.

Ключевые слова: твердые сплавы, метод аэродинамического звукового упрочнения, износ.

Jigalov A.N.¹, Zholobov A.A.², Telesh V.G.³¹Baranovichi State University, Baranovichi, Belarus²Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus³OJSC «Mozyr Machine-Building Plant», Mozyr, Belarus**EFFICIENCY OF AERODYNAMIC SOUND STRENGTHENING
OF A CARBIDE TOOL UNDER THE CONDITIONS
OF THE OJSC “MOZYR MACHINE-BUILDING PLANT”**

Abstract. The method of aerodynamic sound hardening (ASH) significantly increases the durability of metal-cutting carbide tools working with impact loads. Experimental studies of the wear of WC8 carbide plates hardened by ASH showed that when workpieces from AChS4 cast iron are milled, their wear is reduced, compared to not hardened, by 1.38 ... 2.18 times. Conducted one-factor and multifactor studies of the influence of the cutting regimes of carbide plates WC8, hardened by ASH, on wear during milling of cast iron AChS4 made it possible to obtain empirical dependencies on the basis of which the technological base was created and the ASH method is introduced into the production process at the OJSC “Mozyr Machine-Building Plant” for hardening knives 2021-0015 WC8 GOST 24359-80, intended for processing products with discontinuous surfaces, from AChS4 cast iron.

Keywords: hard alloys, method of aerodynamic sound hardening, wear.

Введение. Одним из наиболее важных факторов, характеризующих эффективность твердосплавного инструмента, является стойкость, которая напрямую зависит от сопротивляемости износу его рабочих поверхностей. Стойкость любого режущего инструмента зависит от геометрических параметров лезвия инструмента, режимов резания, применяемой смазочно-охлаждающей жидкости, свойств обрабатываемого материала, а также от структурных и физико-механических свойств самого инструмента.

Для повышения стойкости режущего твердосплавного инструмента, работающего при прерывистом резании с ударными нагрузками, разработан метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ). Эффект при упрочнении таким методом достигается за счет воздействия волн звуковой частоты на структуру твердых сплавов. В обработанных твердых сплавах происходит измельчение карбидных фаз и их перераспределение, уменьшение дислокаций внутренней структуры. Реализация такого воздействия основана на процессах, протекающих в кристаллической решетке твердых сплавов. Стойкость металлорежущего твердосплавного инструмента, упрочненного методом АДУ, при обработке прерывистых поверхностей повышается в 1,2...3,8 раз [1-5]. Однако, из-за своей недостаточной изученности для широкой гаммы металлорежущего инструмента и условий обработки метод АДУ еще не имеет масштабного применения в промышленности.

Основная часть. Эффективное использование металлорежущего инструмента, с точки зрения производительности обработки и ресурса самого инструмента, возможно лишь на оптимальных режимах резания [6]. Причем оптимальные режимы резания зависят от целого комплекса составляющих, существующих на каждом конкретном производстве: от обрабатываемого материала, существующего оборудования и инструмента, наличия технологической базы, навыков технологов и рабочих-станочников и ряда других.

Для определения влияния режимов резания на износ металлорежущего твердосплавного инструмента, упрочненного методом АДУ, используемого в условиях ОАО «Мозырский машиностроительный завод», проведен ряд исследований.

Обработке подвергались чугуны из антифрикционного чугуна АЧС4 на консольно-фрезерном станке ВМ127М фрезой 2214-0003 60° ГОСТ 24359-80 (фреза торцовая диаметром 125 мм) с 12 ножами 2021-0015 ВК8 ГОСТ 24359-80. На фрезе ножи устанавливались попарно: упрочненный АДУ и неупрочненный. Режимы резания варьировались в зависимости от снимаемых припусков (глубина резания) и существующих параметров оборудования (скорость резания и подача на зуб). На рисунке 1 показан внешний вид фрезы.



Рисунок 1. – Фреза торцовая Ø 125 мм ГОСТ 24359-80 с 12 ножами 2021-0015 ВК8

Эксперименты по влиянию скоростей резания на износ проводились на режимах: подача на зуб $s_z = 0,33$ мм/зуб; глубина резания $t = 3,0$ мм. Скорость резания v была равна 157, 196, 247, 314 м/мин. Замеры величины износа осуществлялись по задней поверхности режущего лезвия на специальном измерительном устройстве, оборудованном микроскопом УИМ-21 (рисунок 2). Выходным параметром являлась величина износа по задней поверхности h_z после 60 мин фрезерования. Результаты измерений ножей для неупрочненного сплава ВК8, соответственно:

- $v = 157$ м/мин $h_{3\text{ ср.}} = 0,84$ мм (0,79; 0,86; 0,83);
- $v = 196$ м/мин $h_{3\text{ ср.}} = 0,89$ мм (0,89; 0,88; 0,90);
- $v = 247$ м/мин $h_{3\text{ ср.}} = 1,00$ мм (1,00; 1,1; 0,9);
- $v = 314$ м/мин $h_{3\text{ ср.}} = 1,35$ мм (1,33; 1,36; 1,35).

Результаты измерений ножей сплава ВК8, упрочненного АДУ, соответственно:

- $v = 157$ м/мин $h_{3\text{ ср.}} = 0,41$ мм (0,42; 0,42; 0,38);
- $v = 196$ м/мин $h_{3\text{ ср.}} = 0,43$ мм (0,43; 0,44; 0,42);
- $v = 247$ м/мин $h_{3\text{ ср.}} = 0,49$ мм (0,52; 0,48; 0,47);
- $v = 314$ м/мин $h_{3\text{ ср.}} = 0,62$ мм (0,60; 0,60; 0,64).

Общий вид изношенных ножей представлен на рисунке 3.

Также проводились экспериментальные исследования износа при вариации подачи на зуб $s_z = 0,21; 0,26; 0,33; 0,38; 0,42$ мм/зуб (при $v = 247$ м/мин и $t = 3,0$ мм) и глубины резания $t = 1,5; 2,25; 3,0; 3,75; 4,5$ мм ($s_z = 0,33$ мм/зуб, $v = 247$ м/мин). В таблице 1 приведены значения износа при вариации подач и глубин резания.



Рисунок 2. – Общий вид измерительного устройства на базе микроскопа УИМ-21

	ВК8 без АДУ			ВК8 с АДУ		
$v = 157$ м/мин						
	$h_{31} = 0,79$ мм	$h_{32} = 0,86$ мм	$h_{33} = 0,83$ мм	$h_{31} = 0,42$ мм	$h_{32} = 0,42$ мм	$h_{33} = 0,38$ мм
$v = 247$ м/мин						
	$h_{31} = 1,00$ мм	$h_{32} = 1,10$ мм	$h_{33} = 0,90$ мм	$h_{31} = 0,52$ мм	$h_{32} = 0,48$ мм	$h_{33} = 0,47$ мм
$v = 314$ м/мин						
	$h_{31} = 1,33$ мм	$h_{32} = 1,36$ мм	$h_{33} = 1,35$ мм	$h_{31} = 0,60$ мм	$h_{32} = 0,60$ мм	$h_{33} = 0,64$ мм

Рисунок 3. – Виды износа по задней поверхности h_3 для исследуемых ножей ВК8 при скоростях резания 157, 247, 314 м/мин

В таблице 1 и на рисунке 4 представлены экспериментальные зависимости износа по задней поверхности h_3 твердосплавных ножей ВК8 (с АДУ и без АДУ) от однофакторного влияния скорости резания, подачи и глубины резания.

Обработка экспериментальных результатов и определение эмпирических зависимостей производилась по методике, рассмотренной на примере расчета для сплава ВК8, упрочненного АДУ, при вариации скоростей.

Таблица 1. – Значения износа по задней поверхности сплава ВК8 от подачи и глубин резания

Показатели	Значения показателей														
	номер замера														
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$v = 247$ м/мин $t = 3,0$ мм	$s_z = 0,21$			$s_z = 0,26$			$s_z = 0,33$			$s_z = 0,38$			$s_z = 0,42$		
h_3 , мм, без АДУ	0,95	0,92	0,93	0,95	0,97	0,99	1,00	1,10	0,90	0,96	0,92	0,93	0,92	0,93	0,91
h_3 , мм, с АДУ	0,40	0,43	0,42	0,42	0,44	0,49	0,45	0,50	0,51	0,46	0,49	0,48	0,44	0,42	0,43
$v = 247$ м/мин $s_z = 0,33$ мм/об	$t = 1,5$ мм			$t = 2,25$ мм			$t = 3,0$ мм			$t = 3,8$ мм			$t = 4,5$ мм		
h_3 , мм, без АДУ	1,19	1,22	1,22	1,11	1,12	1,13	1,00	1,10	0,90	0,92	0,89	0,90	0,85	0,84	0,83
h_3 , мм, с АДУ	0,63	0,65	0,64	0,54	0,53	0,55	0,47	0,52	0,48	0,47	0,44	0,43	0,38	0,37	0,39

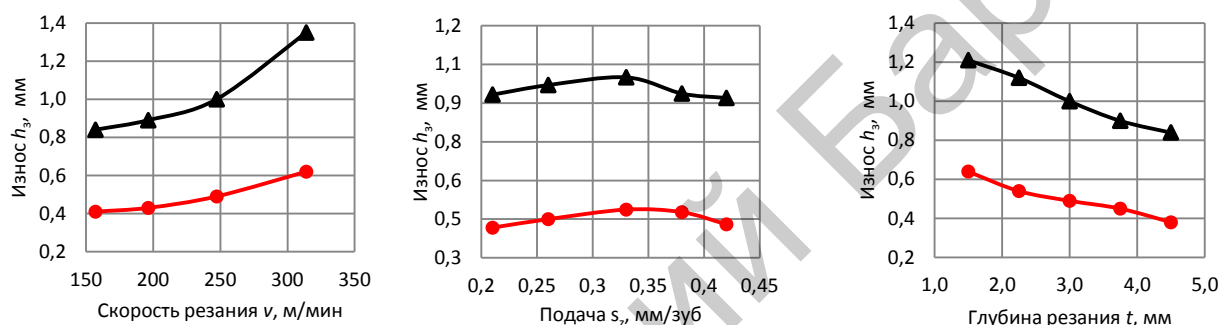


Рисунок 4. – Зависимости износа h_3 при фрезеровании ножами ВК8 (без упрочнения – \blacktriangle ; с АДУ – \bullet) от скорости резания v , подачи на зуб s_z и глубины резания t

В связи с тем, что экспериментальные кривые, представленные на графиках рисунка 4, не являются линейными, то уравнения регрессии рассчитывались в виде степенной зависимости износа h_3 от скорости резания v [6]:

$$h_3 = a \cdot v^n, \quad (1)$$

где a – постоянная величина, характеризующая интенсивность износа от времени;
 n – постоянная величина, представляющая собой в логарифмических координатах тангенс угла наклона кривой.

Оценочное уравнение регрессии (построенное по выборочным данным) имеет вид:

$$h_3 = a \cdot v^n + \varepsilon, \quad (2)$$

где ε – наблюдаемые значения (оценки) случайных ошибок.

Так как отклонения ε для каждого конкретного наблюдения случайны и их значения в выборке неизвестны, то величины a и n носят случайный характер.

После линеаризации зависимости (1) имеем:

$$\ln(h_3) = \ln(a) + n \ln(v). \quad (3)$$

Для оценки параметров a и n использовался метод наименьших квадратов, который весьма эффективен для решения переопределенных систем уравнений, когда количество уравнений превышает количество неизвестных, и является одним из базовых методов регрессивного анализа для оценки неизвестных параметров регрессионных моделей по выборочным данным. Коэффициенты a и n находились через решение системы нормальных уравнений [7]:

$$\begin{cases} a \cdot i + n \sum v_i = \sum \ln(h_{3i}); \\ a \cdot \sum v_i + n \sum v_i^2 = \sum (v_i \cdot \ln(h_{3i})). \end{cases} \quad (4)$$

Расчетные параметры регрессии, исходя из системы уравнений (4) для параметров h_3 и v , при обработке сплавом ВК8, упрочненным АДУ, представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Значения параметров регрессии

№ измерения	Значения показателей					
	v	h_3	$\ln(h_3)$	v^2	$\ln(h_3)^2$	$v \cdot \ln(h_3)$
1	160	0,41	-0,8916	25600	0,7949	-142,6557
3	250	0,49	-0,7133	62500	0,5089	-178,3375
4	315	0,62	-0,478	99225	0,2285	-150,5813
сумма	725	1,94	-2,083	187325	1,5323	-471,5744

С учетом данных таблицы 2 система уравнений (4) примет вид:

$$3a + 725 \cdot n = -2,083 \quad \text{и} \quad 725 \cdot a + 187325 \cdot n = -471,574. \quad (5)$$

Решая систему уравнений (5), коэффициенты регрессии: $a = -1,3288431$; $n = 0,00263$.

На этапе моделирования зависимостей износа от скорости резания выбираем парную экспоненциальную регрессию, которая применяется для описания нелинейных видов зависимостей результирующего параметра от одного независимого фактора. Тогда зависимость (1) для параметров h_3 и v при обработке сплавом ВК8, упрочненным АДУ, преобразуется в экспоненциальное эмпирическое уравнение регрессии:

$$h_3 = e^{-1,3288431} \cdot e^{0,00263v} = 0,26478 \cdot e^{0,00263v}. \quad (6)$$

Аналогично определялись эмпирические уравнения регрессии износа по задней поверхности h_3 от скорости резания без АДУ, подачи на зуб, глубины резания, без АДУ и с АДУ. Проверка адекватности полученных эмпирических зависимостей осуществлялась по известным методикам [7, 8].

Коэффициент корреляции для исследуемых параметров $x(v, s_z, t)$ определялся как

$$\beta_i = n \frac{S_x}{S_{h_3}}, \quad (7)$$

где S_x, S_{h_3} – среднеквадратические отклонения параметров $x(v, s_z, t)$ и h_3 соответственно,

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{i} - \bar{x}^2}, \quad S_{h_3} = \sqrt{\frac{\sum \ln(h_3)^2}{i} - \bar{h}_3^2}.$$

Коэффициент корреляции показывает, что в пределах доверительного интервала увеличение варьируемого значения $x(v, s_z, t)$ на величину среднеквадратического отклонения S_x приведет к увеличению среднего значения h_3 на величину (в процентах) среднеквадратичного отклонения S_{h_3} .

Теснота связи между параметрами v, s_z, t определялась с помощью множественного индекса корреляции R , отражающего тесноту связи и точность полученной модели:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (h_{3i} - h_{3x})^2}{\sum (h_{3i} - \bar{h}_3)^2}}, \quad (8)$$

где h_{3i}, h_{3x} и \bar{h}_3 – величины износа по задней поверхности для каждого измерения (абсолютного и по модулю) среднеарифметических значений для каждого измеряемого параметра v, s_z, t соответственно.

Чем ближе к 1,0 величина индекса корреляции R , находящаяся в границах от 0 до 1, тем более тесная связь факторов v , s_z , t с величиной износа h_3 .

Проверка гипотез относительно коэффициентов линейных уравнений регрессии осуществлялась посредством t -статистики – критерия Стьюдента. Наблюдаемые коэффициенты корреляции для значений n и a сравнивались с значением критической точки $t_{\text{крит}} = 12,706$ двусторонней критической области.

На основании приведенных выше методик были определены эмпирические зависимости износа по задней поверхности металлорежущих твердосплавных пластин ВК8 от скорости резания, подачи на зуб и глубины резания, а также проведены оценки полученных зависимостей (таблица 3).

Таблица 3. – Зависимости износа от режимов резания сплава ВК8, без и с АДУ, и их оценки

Зависимости износа сплава ВК8 от вида упрочнения и параметров обработки			Значения показателей			
			β_i , %	$R (< 1,0)$	t_n	t_a
при $t_{\text{крит}} = 12,706$						
от скорости	без АДУ	$h_3 = 0,47125 \cdot e^{0,00324v}$	98,1	0,98	4,72	4,39
	с АДУ	$h_3 = 0,26478 \cdot e^{0,00263v}$	98,5	0,98	11,09	22,47
от подачи	без АДУ	$h_3 = 0,95422 \cdot e^{-0,016s}$	93,72	0,026	0,039	0,34
	с АДУ	$h_3 = 0,4213 \cdot e^{0,1754s}$	92,3	0,21	0,5	7,42
от глубины	без АДУ	$h_3 = 1,44831 \cdot e^{0,1217t}$	100,0	1,0	38,28	35,96
	с АДУ	$h_3 = 0,8288 \cdot e^{0,1738t}$	100,0	1,0	140,23	46,76

Анализ оценок, приведенных в таблице 3, показывает, что полученные зависимости в виде парных экспоненциальных регрессий в пределах доверительных интервалов достаточно хорошо коррелируются с экспериментальными данными, на что указывают коэффициенты корреляции β_i , находящиеся в пределах 92,3...100 %.

Полученные эмпирические зависимости износа от скорости и глубины резания имеют высокую степень связей между режимами резания и износом, о чем говорят величины индексов корреляции R , которые находятся в пределах от 0,98 до 1,0, что является довольно близким к 1,0. В тоже время в эмпирических зависимостях износа от подачи на зуб влияние подачи на износ незначительно, на что указывают величины индексов корреляции R , находящихся в пределах от 0,026 до 0,21.

Для эмпирических зависимостей износа от скорости резания и подачи на зуб статистическая значимость коэффициентов регрессии n подтверждается, поскольку коэффициенты $t_n < 12,706$ (12,706 табличное значение). Это означает, что коэффициенты n при факторах v и s_z существенно влияют на износ h_3 . Для эмпирических зависимостей износа от глубины резания статистическая значимость коэффициентов регрессии n не подтверждается, поскольку коэффициенты $t_n > 12,706$. Поэтому, в данном случае коэффициенты n не существенно влияют на износ, и ими даже можно пренебречь.

Для эмпирических зависимостей износа от скорости резания с АДУ и от подачи (с АДУ и без АДУ) статистическая значимость коэффициентов регрессии a подтверждается, поскольку коэффициенты $t_a < 12,706$, что говорит о том, что коэффициенты a при факторах v и s_z существенно влияют на износ h_3 . Для эмпирических зависимостей износа от скорости резания сплавом с АДУ и глубины резания статистическая значимость коэффициентов регрессии a не подтверждается, поскольку коэффициенты $t_a > 12,706$.

На рисунке 5 приведены графики, построенные по результатам экспериментов и данных, полученных на основании эмпирических зависимостей из таблицы 3.

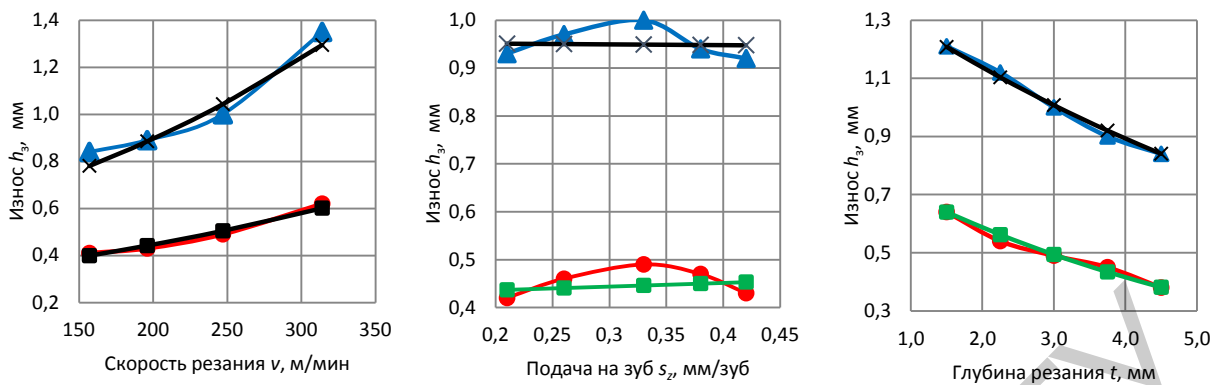


Рисунок 5. – Экспериментальные (▲; ●) и эмпирические без упрочнения (×; ■) зависимости износа h_3 при фрезеровании ножами ВК8 (без упрочнения ▲; с АДУ ●) от скорости резания v , подачи на зуб s_z и глубины резания t

Установлено (рисунок 5) на основе экспериментальных и эмпирических исследований, что износ твердосплавного инструмента из сплава ВК8, упрочненного методом АДУ, при обработке прерывистых поверхностей в пределах исследуемых режимов резания в 1,38...2,18 раза меньше, чем износ пластин ВК8 без АДУ. Повышение стойкости металлорежущих твердосплавных пластин ВК8 с АДУ составляет: при изменении скорости резания в пределах 160...315 м/мин – в 1,78...2,15 раза; при изменении подачи на зуб в пределах 0,21...0,38 мм/зуб – в 2,11...2,18 раз; при изменении глубины резания в пределах 1,5...4,5 мм – в 1,38...1,62 раза. Более эффективно показывают себя упрочненные методом АДУ пластины, в сравнении с неупрочненными, при относительно средних и высоких режимах резания. Из экспериментальных данных прослеживается общая тенденция для твердосплавных пластин, упрочненных методом АДУ, которая показывает, что наиболее сильно на величину износа влияет скорость резания, менее сильно – подача на зуб, еще слабее – глубина резания.

Многофакторное исследование износа пластин ВК8 с АДУ и без АДУ от режимов резания проводилось по матрице X планирования, приведенной в таблице 4.

Таблица 4. – Матрица X планирования многофакторного эксперимента с замерами

№ замера	Значения показателей			
	h_3	v	s_z	t
1	0,54	315	0,42	4,5
2	0,67	315	0,42	1,5
3	0,55	315	0,21	4,5
4	0,65	315	0,21	1,5
5	0,52	160	0,42	1,5
6	0,44	160	0,42	4,5
7	0,42	160	0,21	4,5
8	0,53	160	0,21	1,5
9	0,47	250	0,33	3,0
10	0,52	250	0,33	3,0
11	0,48	250	0,33	3,0

Для многофакторных исследований износа сплава ВК8, упрочненного АДУ, уравнение множественной регрессии можно представить в виде [7]:

$$h_3 = f(\beta, X) + \varepsilon, \quad (9)$$

где β – вектор параметров (подлежащих определению);

X – вектор независимых (объясняющих) переменных v, s_z, t ; $X = X(v, s_z, t)$;

ε – случайная ошибка (отклонение);

h_3 – зависимая (объясняемая) переменная – износ по задней поверхности.

Теоретическое линейное уравнение множественной регрессии (9) можно преобразовать в вид:

$$h_3 = \beta_0 + \beta_1 v + \beta_2 s_z + \beta_3 t + \varepsilon, \quad (10)$$

где β_0 – свободный член, определяющий значение h_3 при условии, когда все объясняющие переменные v, s_z, t равны нулю.

Уравнение (10) множественной регрессии можно представить в виде:

$$h_3 = b_0 + b_1v + b_2s_z + b_3t + \varepsilon_\varepsilon, \quad (11)$$

где b_0, b_1, b_2, b_3 – оценки теоретических значений $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ коэффициентов регрессии (эмпирические коэффициенты регрессии);

ε_ε – оценка отклонения ε .

Для оценки уравнения регрессии предварительно определялся вектор оценок коэффициентов регрессии. Для метода наименьших квадратов (МНК) вектор h_3 равен:

$$h_3 = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (12)$$

где $X, X^T, (X^T X)^{-1}, Y$ – ряд соответствующих матриц.

Сложная матрица X^T построена путем добавления к матрице с переменными X (таблица 4) единичного столбца и представлена в таблице 5. Матрица $(X^T X)$, приведенная в таблице 6, получена путем умножения матриц X^T и X , для чего значения в строках матрицы $(X^T X)$ определялись, как суммы произведений строк матрицы X^T и i -го значения столбца из матрицы X . Аналогично получены матрицы $X^T Y$ и $(X^T X)^{-1}$, приведенные в таблице 7.

Таблица 5. – Матрица X^T

$X^T =$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	315	315	315	315	160	160	160	160	250	250	250
	0,42	0,42	0,21	0,21	0,42	0,42	0,21	0,21	0,33	0,33	0,33
	4,5	1,5	4,5	1,5	1,5	4,5	4,5	1,5	3,0	3,0	3,0

Таблица 6. – Матрица $(X^T X)$

$X^T X =$	11	2650	3,51	33
	2650	686800	846	7950
	3,51	846	1,2087	10,53
	33	7950	10,53	117

Таблица 7. – Матрицы $(X^T Y)$ и $(X^T X)^{-1}$

$X^T Y =$	5,79	$(X^T X)^{-1} =$	2,924	-0,00495	-3,575	-0,167
	1432,25		-0,00495	0,000021	-0,000095	0
	1,848		-3,575	-0,000095	11,276	0
	16,74		0,167	0	0	0,0556

В результате, с учетом матриц (таблицы 4-7), вектор оценок коэффициентов регрессии (12) представлен в таблице 8.

Тогда уравнение регрессии (11) с учетом данных таблицы 8 примет вид:

$$h_3 = 0,445 + 0,000765 v + 0,00167s_z - 0,035t. \quad (13)$$

Таблица 8. – Вектор оценок коэффициентов регрессии уравнения (12)

$Y(X) =$	2,924	-0,00495	-3,575	-0,167	5,79	0,445
	-0,00495	0,000021	-0,000095	0	x 1432,55	= 0,000765
	-3,575	-0,000095	11,276	0	1,848	0,00167
	0,167	0	0	0,0556	16,74	-0,035

Оценка параметров уравнения множественной регрессии (13) осуществлялась по методике для метода МНК. Расчеты тесноты совместного влияния исследуемых факторов на результат, оцениваемые через индекс множественной корреляции, который равен $R = 0,915$, показали, что статистическая значимость коэффициентов регрессии $b_0 = 0,445, b_1 = 0,000765$ и $b_3 = -0,035$ подтверждается, а $b_2 = 0,00167$ не подтвержда-

ется. Коэффициент детерминации (Фишера) статистически значим, следовательно, уравнение регрессии (13) статистически надежно, коэффициенты b_i совместно значимы.

На рисунке 6 приведены графики износа для сплава ВК8, упрочненного АДУ, от одного из факторов режимов резания, построенные по результатам экспериментов и по эмпирической зависимости (13). На рисунке 7 приведены зависимости (13) от двух факторов.

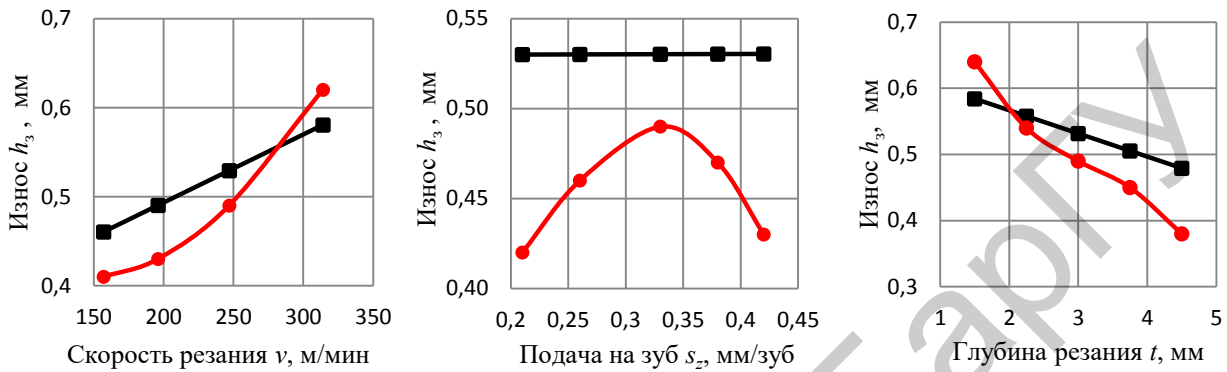


Рисунок 6. – Экспериментальные (●) и эмпирические (■) зависимости износа h_3 при фрезеровании ножами ВК8 с АДУ от скорости резания, подачи на зуб s_z и глубины резания t

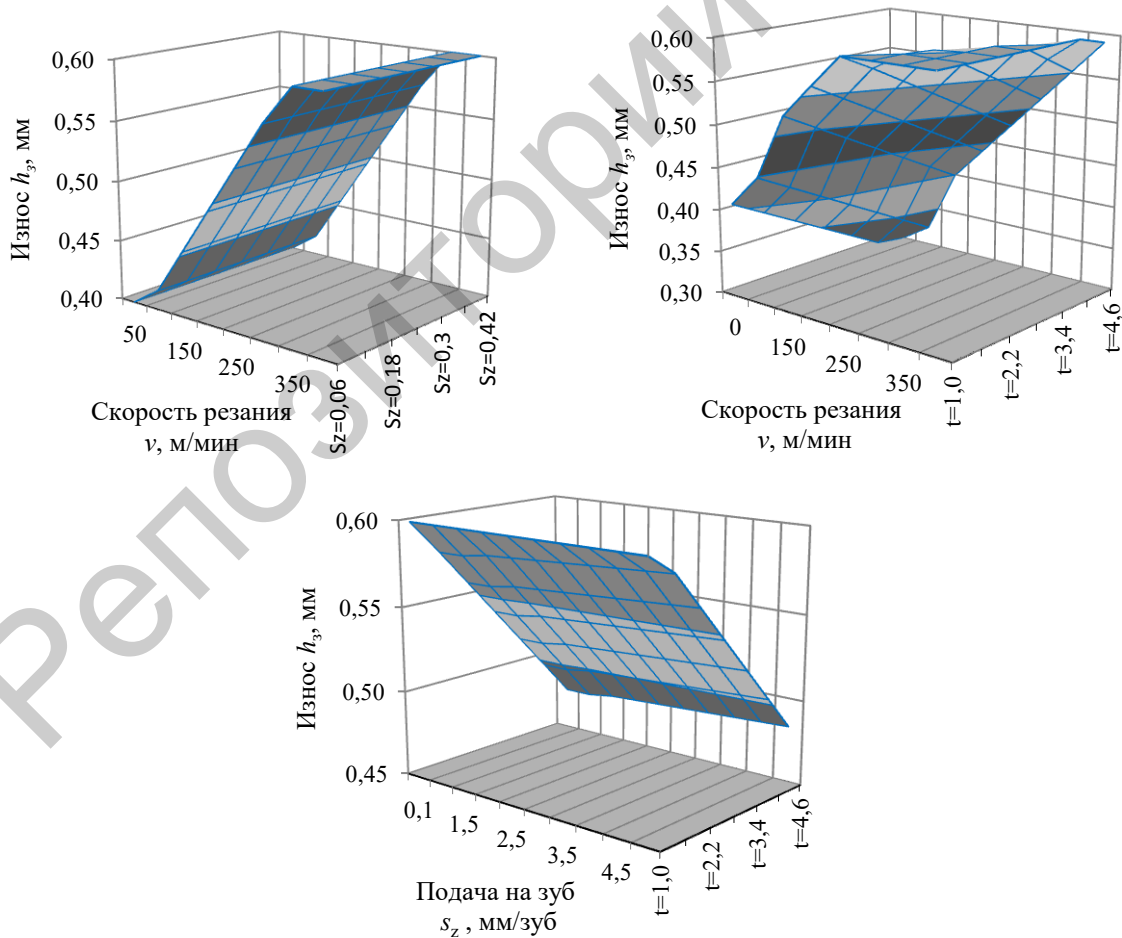


Рисунок 7. – Эмпирические зависимости износа по задней поверхности h_3 пластин ВК8 с АДУ при фрезеровании чугуна АСЧ4 от режимов v, s_z, t

Выводы.

1. Исследования износа металлорежущего твердосплавного инструмента сплава ВК8, упрочненного методом АДУ, при обработке прерывистых поверхностей показали повышение стойкости в 1,38...2,18 раза.

2. Из экспериментальных данных прослеживается общая тенденция для твердосплавных пластин, упрочненных методом АДУ, которая показывает, что наиболее сильно на величину износа влияет скорость резания, менее сильно – подача на зуб, еще слабее – глубина резания.

3. Смоделированы через парную экспоненциальную регрессию однофакторные зависимости износа от скорости, подачи на зуб и глубины резания при фрезеровании заготовок из чугуна АСЧ4 твердосплавным инструментом ВК8, без упрочнения и с упрочненным АДУ: без упрочнения $h_3 = 0,47125 \cdot e^{0,00324v}$, $h_3 = 0,95422 \cdot e^{-0,016s}$, $h_3 = 1,44831 \cdot e^{0,1217t}$; с упрочнением АДУ $h_3 = 0,26478 \cdot e^{0,00263v}$, $h_3 = 0,4213 \cdot e^{0,1754s}$, $h_3 = 0,8288 \cdot e^{0,1738t}$.

4. Многофакторное моделирование износа сплава ВК8, упрочненного АДУ, при фрезеровании чугуна АСЧ4 от режимов резания позволило получить уравнение регрессии в виде $h_3 = 0,445 + 0,000765 v + 0,00167s_z - 0,035t$. Расчеты совместного влияния исследуемых факторов на износ показали, что статистическая значимость свободного коэффициента регрессии b_0 и коэффициентов b_1 , b_3 , стоящих при v и t , подтверждается, а коэффициента b_2 , стоящего при s_z , не подтверждается.

5. В результате созданной технологической базы на основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований метод АДУ был внедрен в производственный процесс на ОАО «Мозырский машиностроительный завод» для упрочнения ножей 2021-0015 ВК8 ГОСТ 24359-80, предназначенных для обработки изделий, имеющих прерывистые поверхности из антифрикционного чугуна АЧС4.

Список использованных источников

1. 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.
2. Жигалов, А.Н. К теории аэродинамического упрочнения: колебательные процессы в кристаллической решетке твердых сплавов / А.Н. Жигалов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 3 (60). – С. 77-86.
3. Жигалов, А.Н. Исследование влияния аэродинамического упрочнения на стойкость твердосплавного инструмента при прерывистом резании / А.Н. Жигалов, В.К. Шелег // Машиностроение: Респ. Межведомств. сб. науч. тр. Вып. 31 / БНТУ; под ред. В.К. Шелега. – Минск, 2018. – С. 37-48.
4. Zhigalov, A.N. Improved Hard Alloys for Efficient Milling / A.N. Zhigalov, A.R. Maslov, G.F. Shaturov // Russian Engineering Research. – 2015. – No. 11, vol. 35. – P. 818-821.
5. Zhigalov, A.N. Investigation of the carbide-tipped tool wear hardened by method of aerodynamic impact / A.N. Zhigalov, V.V. Stypnicki // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – 2018. – No. 6, vol. 32. – P. 818-821.
6. Жигалов, А.Н. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из чугуна / А.Н. Жигалов, А.А. Жолобов, В.К. Шелег // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 3 (64). – С. 36-47.

7. Елисеева, И.И. Общая теория статистики / И.И. Елисеева, М.М. Юзбашев. – Москва: Финансы и статистика, 2005. – 656 с.

8. Ефимова, М.Р. Общая теория статистики: учебник / М.Р. Ефимова, Е.В. Петрова, В.Н. Румянцев. – 2-е изд. – М.: Инфра-М, 2011. – 416 с.

Информация об авторах

Жигалов Анатолий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Барановичский государственный университет (ул. Войкова, 21, 225404, г. Барановичи, Беларусь), e-mail: jigalov6@mail.ru.

Жолобов Александр Алексеевич – кандидат технических наук, профессор, Белорусско-Российский университет (проспект Мира, 43, 212000, г. Могилев, Беларусь), e-mail: BRU_AA@mail.ru.

Телеш Владимир Григорьевич – заместитель главного инженера ОАО «Мозырский машиностроительный завод» (ул. Портовая, 17, 247760, г. Мозырь, Беларусь), e-mail: vova_mmz@mail.ru.

Information about the authors

Jigalov Anatoly Nikolaevich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Baranovichi State University (21, Voykova Str., 225404, Baranovichi, Belarus), e-mail: jigalov6@mail.ru.

Zholobov Aleksandr Alekseyevich – Ph. D. (Engineering), Professor, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212000, Mogilev, Belarus), e-mail: BRU_AA@mail.ru.

Telesh Vladimir Grigoryevich – Deputy chief engineer of OJSC «Mozyr Machine-Building Plant» (17, Portovaya Str., 247760, Mozyr, Belarus), e-mail: vova_mmz@mail.ru.

Поступила в редакцию 14.04.2020 г.

РЕПОЗИТОРИЙ БГУ