

# ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ 2019 № 3



# ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 3 2019

---

---

**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), 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), 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](mailto: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», 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

### ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

- Прохоров Н.Н., Ефимов А.М., Ущাপовский И.Ф., Кафанова Т.П., Барбиков Д.В., Клабук А.М.** Определение границы распространения обводненных пород вдоль контура выклинивания Третьего калийного горизонта Старобинского месторождения геофизическими методами ..... 5
- Басалай И.А.** Воздействие дробильно-сортировочного завода по производству щебня на окружающую среду ..... 15

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Локтионов А.В.** Расчет уравнения и кинетического момента системы при радиальном перемещении тела по вращающемуся диску ..... 21
- Павлечко В.Н.** Изменение тангенциального давления среды на лопасти в каналах радиальной турбины ..... 29
- Казаченко Г.В., Нагорский А.В.** Метод решения уравнений равновесия статического поворота самоходной гусеничной машины ..... 36
- Березовский Н.И., Воронова Н.П., Борисейко В.В.** Оптимизация конструктивных параметров двухзонного прямоточного сушильного агрегата ..... 44
- Казаченко Г.В.** Взаимодействие опорных площадок ходовых устройств мобильных машин с несущим основанием ..... 50
- Шелег В.К., Жигалов А.Н.** Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из стали ..... 56
- Моисеенко В.Л., Жигар В.И., Письменная Н.В., Моисеенко В.В.** Современные методы сборки путевой решетки ..... 66
- Басалай Г.А.** Снижение энергоемкости транспортирования руды скребковым конвейером ..... 75

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Приходько И.В., Близнац Д.А.** Основные факторы коррозионного разрушения и используемые методы защиты ..... 80
- Инютин В.И., Кожедуб С.С., Кирьянова А.А., Пантюхов О.Е., Шаповалов В.М.** Технология переработки отходов кожевенно-обувных производств и вторичного полиэтилена в композиционный материал ..... 91
- Швайба Дз.М.** Асноўныя пытанні пры вывучэнні сацыяльна-эканамічнай бяспекі .... 97

На обложке: мельница для мокрого измельчения различных руд и других материалов.

На 1-й стр.: агрегат для ремонта нефтяных и газовых скважин АПР-50/60.

На 3-й стр.: машина самоходная буровая универсальная МСБУ 42-6×31.

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 02.09.2019 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м<sup>2</sup>.

Заказ 3331. Усл. печ. л. 12,01. 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

№ 3 2019

---

---

**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), 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), 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](mailto: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”, 2019

## CONTENTS

---

---

### *GEOTECHNOLOGY*

- Prokhorov N.N., Efimov A.M., Ushchapousky I.F., Kafanova T.P., Barbikov D.V., Klabuk A.M.** Defining the boundaries of the distribution of watered rocks along the contour of thinning of the Third potassium horizon of the Starobin potassium deposit by geophysical methods ..... 5
- Basalai I.A.** Environment's exposure to a rock-crushing plant producing breakstone ..... 15

### *MACHINE-BUILDING*

- Loktionov A.V.** Calculation of the equation and the kinetic momentum of the system with radial displacement of the body along a rotating disk ..... 21
- Pavlechko V.N.** Fluid pressure on the blades in the inter-blade channels of a radial-flow turbine ..... 29
- Kazachenko G.V., Nahorski A.V.** Method for solving equilibrium equations of static turning of a self-propelled tracked vehicle ..... 36
- Berezovsky N.I., Voronova N.P., Boriseyko V.V.** Optimization of design parameters of two-zone direct-flow drying unit ..... 44
- Kazachenko G.V.** Interaction of support points of traveling devices of mobile machines with a bearing base ..... 50
- Sheleg V.K., Jigalov A.N.** Research of the influence of the method of aerodynamic sound hardening on wear of a hard-carbide tool during milling steel material ..... 56
- Moiseenko V.L., Zhigar V.I., Pismennaya N.V., Moiseenko V.V.** Modern methods of assembly of the railway grid ..... 66
- Basalai R.A.** Reduction of power intensity of ore transportation by chain and flight conveyor ..... 75

### *MATERIALS ENGINEERING*

- Prihodzko I.V., Bliznets D.A.** The main factors of corrosion destruction and protection methods used ..... 80
- Injutin V.I., Kozhedub S.S., Kir'janova A.A., Pantjukhov O.E., Shapovalov V.M.** Technology for processing waste from leather and footwear production and recycled polyethylene into composite material ..... 91
- Shvaiba D.** The main issues in the study of socio-economic security ..... 97
- 
-

УДК 621.914.025.7:620.178.16(045)(476)

**Шелег В.К.<sup>1</sup>, Жигалов А.Н.<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь<sup>2</sup>МОУВО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО  
ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ИЗНОС ТВЕРДОСПЛАВНОГО  
ИНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛА ИЗ СТАЛИ**

**Аннотация.** Метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) существенно повышает стойкость твердосплавного инструмента, работающего с ударными нагрузками, при фрезерной обработке стали 45. Твердосплавные пластины, упрочненные методом АДУ, при обработке стали 45 превышают по стойкости аналогичные неупрочненные пластины в 2,1...4,2 раза. Получены степенные зависимости износа задней поверхности твердосплавных пластин MC131 и MC111, неупрочненных и упрочненных АДУ, от времени резания при обработке стали 45. Такими зависимостями удобно пользоваться для предварительного выбора твердосплавной пластины и назначения режимов резания, а также планирования ресурсной стойкости пластины.

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

**Sheleg V.K.<sup>1</sup>, Jigalov A.N.<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus<sup>2</sup>Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus**RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE METHOD OF AERODYNAMIC  
SOUND HARDENING ON WEAR OF A HARD-CARBIDE TOOL DURING  
MILLING STEEL MATERIAL**

**Abstract.** The method of aerodynamic sound hardening (ADH) significantly increases the durability of hard-carbide tools working with shock loads when milling steel 45. Hard-carbide plates hardened by the method of ADH when milling steel 45 are resistant 2,1 ... 4,2 times more than the same non-hardened plates. Degree dependencies of wear of the hard-carbide plates' back surface MC131 and MC111, non-hardening and hardening by ADH, on cutting time during milling steel 45 have been obtained. It is convenient to use these dependencies for preselection of hard-carbide plates and assignment of cutting conditions, as well as planning plate's resource durability.

**Keywords:** hard-carbide alloys, the method of aerodynamic sound hardening, wear.

**Введение.** Для повышения стойкости твердых сплавов, представляющих собой гетерогенные композиции, состоящие из порошков карбидов вольфрама, титана, тантала, цементированных кобальтовой связкой, работающих в тяжелых технологических условиях с переменной ударной нагрузкой, создан метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) [1, 2]. Эффект при упрочнении таким методом достигается за счет воздействия волн звуковой частоты на структуру твердых сплавов. В упрочненных твердых сплавах происходит измельчение карбидных фаз и их перераспределение, уменьшение дислокаций внутренней структуры [3]. Реализация такого воздействия основана на процессах, протекающих в кристаллической решетке твердых сплавов. После упрочнения методом АДУ происходит уменьшение количества крупных и возрастание количества мелких зерен, уменьшение размеров кристаллов, снижение плотности дис-

локаций (для твердых сплавов ВК8 и Т5К10 уменьшается на 12...16 % по сравнению с неупрочненными твердыми сплавами), повышение прочностных свойств твердых сплавов (для сплавов Т5К10, Т15К6, ВК6, ВК8 рост ударной вязкости и предела прочности при изгибе – 19...23 %), при этом не происходит снижения твердости и плотности. Метод АДУ позволяет получать твердосплавные пластины с новыми, ранее не известными физико-механическими свойствами, причем с более высокими, чем стандартные [4].

Метод АДУ является новым методом, в связи с чем, естественный интерес представляет проведение исследований влияния метода АДУ на стойкость твердосплавного инструмента при обработке различных материалов.

Исследования осуществлялись на твердосплавных пластинах формы РNUA-110408 ГОСТ 19064-80 из сплавов Т15К6, Т5К10, МС111, МС113. Обработка производилась на карусельно-фрезерном станке модели ГФ2211 фрезой торцовой диаметром  $d = 63$  мм с установленными на ней пятью пластинами. Пластины размещались в корпусе торцовой фрезы с соблюдением главного и вспомогательного углов в плане  $\varphi = 64^\circ$ ,  $\varphi_1 = 8^\circ$ . Углы заточки: передний  $\gamma_3 = 10^\circ$ ; задний  $\alpha_3 = 10^\circ$ .

Обработке подвергались специально изготовленные заготовки из стали 45 (твердость НВ 178...198) размером 70×48 мм (ширина × длина). На каждой установке в пакете было по три заготовки, что позволяло имитировать наличие ударных нагрузок. Замеры износа производились по задней поверхности пластины через определенное время резания на инструментальном стереоскопическом микроскопе Stemi 2000-С фирмы Carl Zeiss с точностью измерений до 0,001 мм.

На рисунке 1 приведены зафиксированные типичные виды износа по задней поверхности  $h_3$  на твердосплавных пластинах при различных режимах и времени резания.

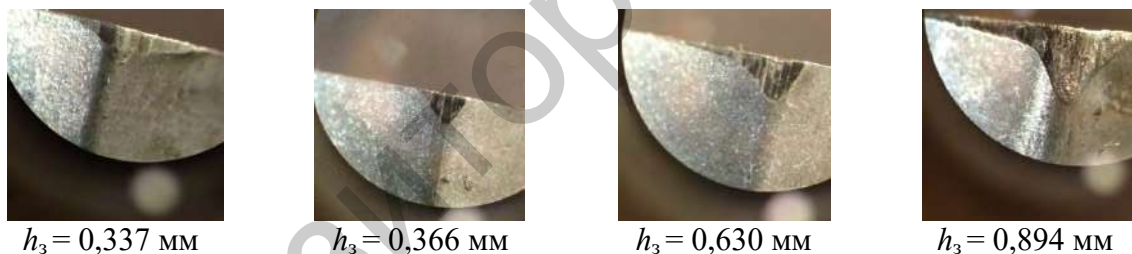


Рисунок 1. – Типичные виды износа по задней поверхности  $h_3$  для твердых сплавов

**Результаты исследований.** На рисунках 2-4 представлены зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  от времени резания  $\tau$  твердосплавных пластин, упрочненных АДУ (Т5К10у, Т15К6у), и таких же пластин без упрочнения (Т5К10ну, Т15К6ну) при различных режимах резания.

Анализ зависимостей, изображенных на рисунках 2-4, показывает, что кривые износа по задней поверхности  $h_3$  твердосплавных пластин, упрочненных методом АДУ, расположены ниже кривых износа аналогичных сплавов, но неупрочненных АДУ, что указывает на то, что метод АДУ повышает стойкость твердосплавных пластин разных твердых сплавов, работающих с ударными нагрузками.

В таблице 1 приведены данные величин износа по задней поверхности  $h_3$  для твердосплавных пластин, упрочненных АДУ и без упрочнения, зафиксированные при времени резания, равном 60 минут, а также сравнительные результаты по уменьшению износа для пластин, упрочненных АДУ.

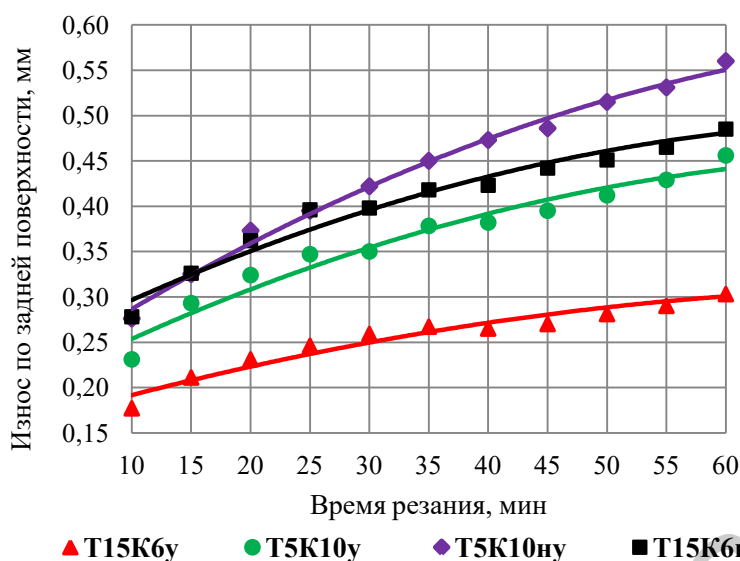


Рисунок 2. – Зависимости износа по задней поверхности  $h_z$  для пластин сплавов T5K10 и T15K6, неупрочненных (T5K10ny, T15K6ny) и упрочненных АДУ (T5K10y, T15K6y), при фрезеровании стали 45 на режимах: скорость  $v = 124,3$  м/мин, подача на зуб  $s_z = 0,13$  мм/зуб, глубина резания  $t = 1,5$  мм

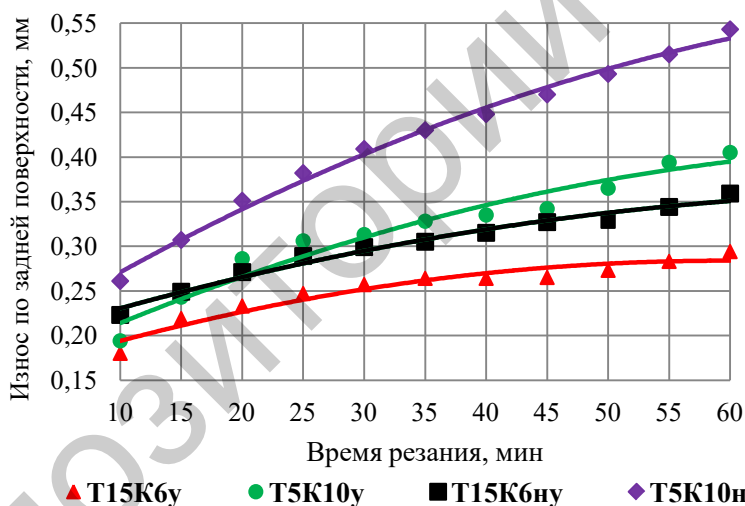


Рисунок 3. – Зависимости износа по задней поверхности  $h_z$  для пластин сплавов T5K10 и T15K6, неупрочненных (T5K10ny, T15K6ny) и упрочненных АДУ (T5K10y, T15K6y), при фрезеровании стали 45 на режимах: скорость  $v = 158,3$  м/мин, подача на зуб  $s_z = 0,13$  мм/зуб, глубина резания  $t = 1,0$  мм

Анализ данных таблицы 1 показывает, что при 60 минутах фрезерования заготовок из стали 45 для сплавов, упрочненных АДУ, причем как T5K10, так и T15K6, происходит снижение износа при различной вариации режимов резания на 18,6...37,5%. Также следует предположить, что при большей величине времени резания снижение износа упрочненных пластин по сравнению с неупрочненными будет еще больше, так как, исходя из рисунков 2-4, угол подъема кривых износа для упрочненных пластин меньше по сравнению с неупрочненными.

Количественной оценкой износа режущего лезвия от времени может служить линейная или массовая мера износа. Кривые линейного износа режущего лезвия по

задней поверхности  $h_3$  от времени резания  $\tau$  возможно аппроксимировать степенными функциями вида [5]:

$$h_3 = a \cdot \tau^{n_0}, \quad (1)$$

где  $a$  – постоянная величина, характеризующая интенсивность износа от времени (показатель абсолютной величины износа);

$n_0$  – постоянная величина, представляющая собой в логарифмических координатах тангенс угла наклона кривой, описывающей зависимость износа от времени – показатель интенсивности величины износа.

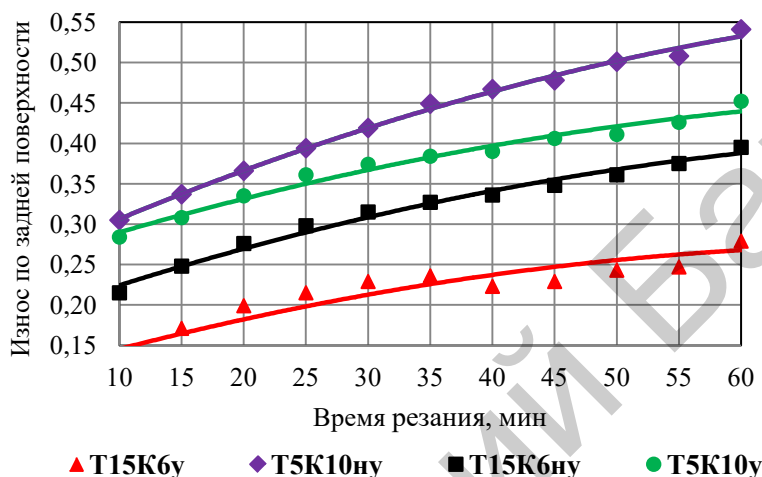


Рисунок 4. – Зависимость износа по задней поверхности  $h_3$  для пластин сплавов T5K10 и T15K6, неупрочненных (T5K10ny, T15K6ny) и упрочненных АДУ (T5K10y, T15K6y), при фрезеровании стали 45 на режимах: скорость  $v = 124,6$  м/мин, подача на зуб  $s_z = 0,13$  мм/зуб, глубина резания  $t = 1,0$  мм

Таблица 1. – Сравнительные данные износа по задней поверхности  $h_3$  для твердосплавных пластин, упрочненных АДУ и без упрочнения, при времени резания, равном 60 минут

Режимы резания	Износ $h_3$ , мм		Снижение износа после упрочнения, %	Износ $h_3$ , мм		Снижение износа после упрочнения, %
	T5K10ny	T5K10y		T15K6ny	T15K6y	
$v = 124,3$ м/мин $s_z = 0,13$ мм/зуб $t = 1,5$ мм	0,550	0,440	20,0	0,480	0,300	37,5
$v = 158,3$ м/мин $s_z = 0,13$ мм/зуб $t = 1,0$ мм	0,535	0,380	29,0	0,350	0,285	18,6
$v = 124,6$ м/мин $s_z = 0,13$ мм/зуб $t = 1,0$ мм	0,536	0,435	18,8	0,385	0,270	29,9

Показатели  $a$  и  $n_0$  связывают между собой величину износа  $h_3$  от времени  $\tau$ . После логарифмирования уравнения (1) имеем:

$$\lg h_3 = \lg a + n_0 \lg \tau. \quad (2)$$

В зависимости (2) показатель относительной стойкости  $n_0$  равен тангенсу угла  $\alpha$  наклона прямой линии, полученной из кривой износа, построенной в логарифмической системе:

$$n_0 = \operatorname{tg} \alpha = \frac{h_{z_i} - h_{z_1}}{\tau_i - \tau_1}, \quad (3)$$

где  $h_{z_i}$  и  $h_{z_1}$  – значения износа в логарифмической системе координат соответственно в  $i$ -ой и первой точках;

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

Коэффициент  $a$  из (2) определяется как

$$a = \frac{h_{z_i}}{2\tau_i^{n_0}} + \frac{h_{z_1}}{2\tau_1^{n_0}}. \quad (4)$$

Работы по моделированию зависимостей стойкости твердосплавного инструмента от параметров обработки при фрезеровании заготовок из стали 45 проведены твердыми сплавами MC111 и MC131. Твердосплавная пластина MC111 по физико-механическим свойствам аналогична пластине T15K6, а пластина MC131 – T5K10.

Заготовки размерами 25×16 мм из стали 45 с твердостью HB 178...198 фрезеровались на фрезерно-карусельном станке ГФ2110. На каждой установке в пакете было по три заготовки, что позволяло имитировать наличие ударных нагрузок. Инструментом являлась фреза торцовая диаметром 63 мм с пятью зубьями одного наименования сплава.

Результаты однофакторных исследований, приведенные выше (рисунки 2-4), показали, что наибольшее влияние на износ твердосплавных пластин, упрочненных методом АДУ, оказывают по ранжиру такие параметры обработки, как скорость резания  $v$ , подача на зуб  $s_z$  и глубина резания  $t$ . Применялся план полнофакторного эксперимента, состоящий из семи опытов, для каждого материала для трех вариационных параметров обработки:  $v$ ,  $s_z$  и  $t$ . Назначался диапазон вариаций для каждого параметра, исходя из данных предварительных исследований и рекомендаций литературы, с учетом возможности установки на станке реальных режимов резания. Применяемые режимы резания для сплавов MC111 и MC131 представлены в таблице 2, где  $v_{\phi}$  – скорость фрезы,  $n_{\phi}$  – число оборотов фрезы,  $s_{ст}$  – подача стола.

Таблица 2. – Применяемые режимы резания при фрезеровании заготовок из стали 45 твердосплавными пластинами MC131 и MC111, неупрочненными и упрочненными АДУ

Режимы обработки для пластин MC131, MC111					
№	$v_{\phi}$ , м/мин	$s_z$ , мм/зуб	$t$ , мм	$n_{\phi}$ , об/мин	$s_{ст}$ , мм/об
1	158,3	0,13	1,0	800	630
2	124,6	0,13	1,0	630	500
3	158,3	0,13	1,5	800	630
4	158,3	0,13	0,5	800	630
5	158,3	0,11	1,0	800	630
6	158,3	0,26	1,0	800	1250
7	197,8	0,13	1,0	1000	800

Замеры износа осуществлялись на пяти пластинах, по которым определялось среднее значение износа. При выходе значения замера за 20 % от среднего арифметического значения из пяти замеров, такое значение исключалось из расчетов. Среднее значение пересчитывалось по оставшимся значениям. Замеры износа по задней поверхности  $h_3$  производились через 5 мин резания на инструментальном стереоскопическом микроскопе Stemi 2000C с точностью измерений до 0,001 мм.

Для каждого опыта строились графики изменения износа задней поверхности  $h_3$  от времени резания  $\tau$  для зоны устоявшегося резания в абсолютной и в логарифмической системах. Причем логарифмировались значения величин износа и времени по десятичному логарифму. В качестве примера на рисунках 5 и 6 показаны для первого и второго опытов зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  твердосплавных пластин MC131, упрочненных и неупрочненных методом АДУ, от времени резания при фрезеровании заготовок из стали 45.

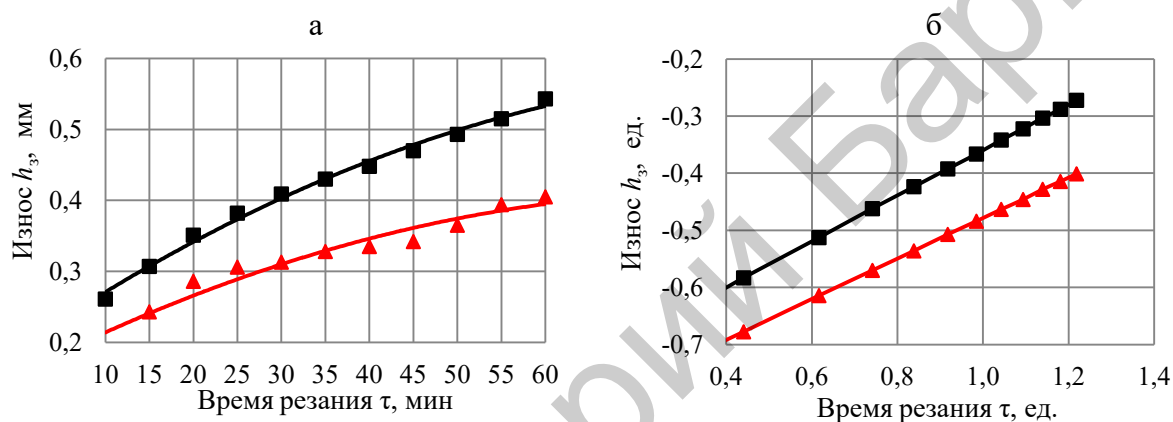


Рисунок 5. – Зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  твердосплавных пластин MC131, упрочненных методом АДУ ( $\blacktriangle$ ) и неупрочненных ( $\blacksquare$ ), от времени резания  $\tau$  при фрезеровании стали 45 в абсолютной (а) и логарифмической (б) системах координат для первого опыта

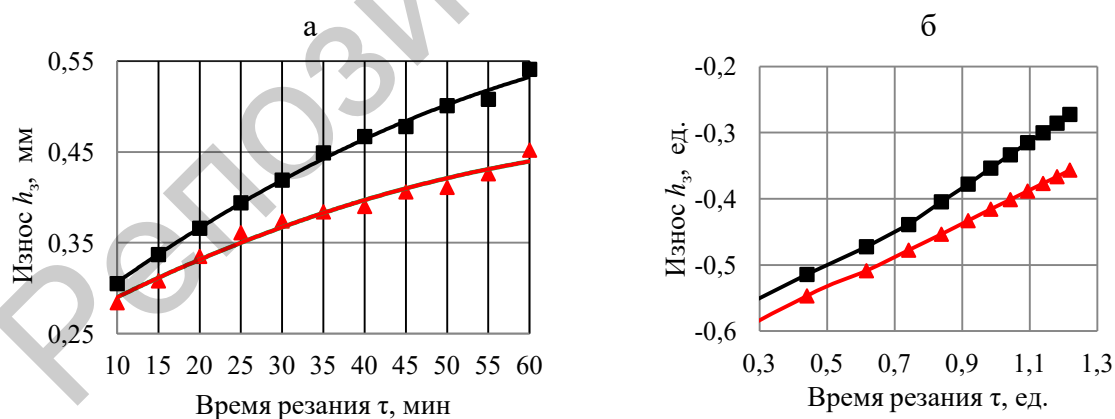


Рисунок 6. – Зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  твердосплавных пластин MC131, упрочненных методом АДУ ( $\blacktriangle$ ) и неупрочненных ( $\blacksquare$ ), от времени резания  $\tau$  при фрезеровании стали 45 в абсолютной (а) и логарифмической (б) системах координат для второго опыта

Графики для семи опытов аналогичны графикам, приведенным на рисунках 5 и 6, обрабатывались следующим образом. На графиках, построенных в логарифмической системе, замерялись значения координат для начальной и конечной точек, между кото-

рыми соблюдалась прямолинейность линии. Например, для первого опыта (рисунок 5) в логарифмической системе координаты кривой, соответствующей неупрочненному сплаву, для первой точки  $\tau_1 = 0,4403$ ;  $h_{31} = -0,5834$ . Для одиннадцатой точки  $\tau_{11} = 1,2184$ ;  $h_{311} = -0,2725$ . Затем на графиках в абсолютной системе определялись координаты для аналогичных точек:  $\tau_1 = 10$  мин;  $h_{31} = 0,261$  мм;  $\tau_{11} = 60$  мин;  $h_{311} = 0,534$  мм. Результаты координат для всех опытов сведены в таблице 3, в которой приведены также расчеты коэффициентов  $n_0$  и  $a$ , определенных по формулам (3) и (4), и значения коэффициентов повышения стойкости  $K_c$  пластин, упрочненных АДУ, относительно неупрочненных. Коэффициенты  $K_c$  определялись по формуле  $K_c = T_y/T_n$  (где  $T_y$  и  $T_n$  – значения стойкости пластин, упрочненных АДУ и неупрочненных).

Таблица 3. – Результаты расчетов коэффициентов  $n_0$ ,  $a$  и  $K_c$  для зависимостей износа от времени резания при фрезеровании твердосплавными пластинами МС131 стали 45

Координаты	$h_{31}$	$h_{3i}$	$\tau_1$	$\tau_i$	$n_0$	$a$	$\tau$ , мин, при $h_3$ , мм		
							0,6	0,8	1,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Опыт № 1									
МС131 неупрочненные									
логарифмические	-0,5834	-0,2725	0,4403	1,2184	0,400				
абсолютные	0,261	0,534	10	60		0,104	80,3	165,0	288,5
МС131 упрочненные АДУ									
логарифмические	-0,6778	-0,4012	0,4403	1,2184	0,355				
абсолютные	0,210	0,397	10	60		0,093	191,8	430,8	807,2
Коэффициент повышения стойкости $K_c$							2,39	2,61	2,80
Опыт № 2									
МС131 неупрочненные									
логарифмические	-0,4389	-0,2725	0,7413	1,2184	0,349				
абсолютные	0,364	0,534	20	60		0,128	83,8	191,2	362,4
МС131 упрочненные АДУ									
логарифмические	-0,4776	-0,3566	0,7413	1,2184	0,254				
абсолютные	0,333	0,440	20	60		0,156	203,8	633,7	1527,4
Коэффициент повышения стойкости $K_c$							2,43	3,31	4,21
Опыт № 3									
МС131 неупрочненные									
логарифмические	-0,4882	-0,2573	0,6164	1,2184	0,383				
абсолютные	0,325	0,553	15	60		0,115	74,2	157,1	281,2
МС131 упрочненные АДУ									
логарифмические	-0,5467	-0,3536	0,6164	1,2184	0,321				
абсолютные	0,284	0,443	15	60		0,119	154,5	378,9	759,9
Коэффициент повышения стойкости $K_c$							2,08	2,41	2,70
Опыт № 4									
МС131 неупрочненные									
логарифмические	-0,5406	-0,2882	0,6164	1,2184	0,419				
абсолютные	0,288	0,515	15	60		0,093	86,4	171,6	292,1
МС131 упрочненные АДУ									
логарифмические	-0,6253	-0,4134	0,6164	1,2184	0,352				
абсолютные	0,237	0,386	15	60		0,091	210,1	475,7	896,8
Коэффициент повышения стойкости $K_c$							2,43	2,77	3,07

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Опыт № 5									
МС131 неупрочненные									
логарифмические	-0,5969	-0,2782	0,4403	1,2184	0,410				
абсолютные	0,253	0,527	10	60		0,099	82,4	166,3	286,7
МС131 упрочненные АДУ									
логарифмические	-0,6517	-0,3883	0,4403	1,2184	0,339				
абсолютные	0,223	0,409	10	60		0,102	186,1	425,4	841,6
Коэффициент повышения стойкости $K_c$							2,26	2,62	2,94
Опыт № 6									
МС131 неупрочненные									
логарифмические	-0,5346	-0,2048	0,4403	1,2184	0,424				
абсолютные	0,292	0,624	10	60		0,110	54,7	107,8	182,6
МС131 упрочненные АДУ									
логарифмические	-0,6364	-0,3516	0,4403	1,2184	0,366				
абсолютные	0,231	0,440	10	60		0,099	137,8	302,4	556,4
Коэффициент повышения стойкости $K_c$							2,52	2,80	3,05
Опыт № 7									
МС131 неупрочненные									
логарифмические	-0,5467	-0,0815	0,4403	1,2184	0,598				
абсолютные	0,284	0,829	10	60		0,072	34,9	56,5	82,1
МС131 упрочненные АДУ									
логарифмические	-0,6440	-0,2959	0,4403	1,2184	0,447				
абсолютные	0,227	0,506	10	60		0,081	87,8	167,0	275,1
Коэффициент повышения стойкости $K_c$							2,51	2,95	3,35

Исходя из данных таблицы 3, зависимости износа по задней поверхности  $h_z$  от времени обработки  $\tau$  при режимах резания, приведенных в таблице 2, после обработки по формуле (1) примут вид степенных функций. Аналогично приведенным выше графическим и аналитическим расчетам осуществлены эксперименты и расчеты для твердого сплава МС111, неупрочненного и упрочненного АДУ. Степенные зависимости износа по задней поверхности  $h_z$  от времени резания  $\tau$  при обработке твердосплавными пластинами МС131 и МС111 при фрезеровании стали 45 приведены в таблице 4.

**Выводы.** Сравнительные результаты исследований износа твердых сплавов от времени резания стали 45 показали, что метод АДУ оказывает существенное влияние на стойкость твердосплавных пластин разных твердых сплавов, работающих с ударными нагрузками. После 60 минут фрезерования заготовок из стали 45 для сплавов Т5К10 и Т15К6, упрочненных АДУ, происходит снижение износа при различной вариации режимов резания на 18...37,5 % по сравнению с аналогичными неупрочненными пластинами.

Твердосплавные пластины МС131, упрочненные методом АДУ, при обработке стали 45 превышают по стойкости аналогичные неупрочненные пластины в 2,1...4,2 раза. При этом, с повышением величины допустимого износа  $h_{з\text{доп}}$  пластины коэффициент повышения стойкости  $K_c$  увеличивается: при  $h_{з\text{доп}} = 0,6$  мм –  $K_c = 2,1...2,5$ ; при  $h_{з\text{доп}} = 0,8$  мм –  $K_c = 2,4...3,3$ ; при  $h_{з\text{доп}} = 1,0$  мм –  $K_c = 2,7...4,2$ .

Комбинация режимов резания оказывает существенное влияние на стойкость твердосплавных пластин МС131, причем как неупрочненных, так и упрочненных АДУ. При величине допустимого износа по задней поверхности  $h_{з\text{доп}} = 0,8$  мм при режимах

резания:  $v = 124,6$  м/мин;  $s_z = 0,13$  мм/зуб;  $t = 1,0$  мм, стойкости составляют  $T_y = 633,7$  мин и  $T_n = 191,2$  мин, а при режимах резания:  $v = 197,8$  м/мин;  $s_z = 0,13$  мм/зуб;  $t = 1,0$  мм, стойкости составляют  $T_y = 167,0$  мин и  $T_n = 56,5$  мин, что отличается практически в три раза.

Таблица 4. – Зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  от времени  $\tau$  при фрезеровании стали 45 на различных режимах резания твердосплавными пластинами MC131 и MC111

№	Режимы резания			Зависимости износа по задней поверхности от времени	
	$v$ , м/мин	$s_z$ , мм/зуб	$t$ , мм	пластины MC131н	пластины MC131у
1	158,3	0,13	1,0	$h_3 = 0,104 \tau^{0,400}$	$h_3 = 0,093 \tau^{0,355}$
2	124,6	0,13	1,0	$h_3 = 0,128 \tau^{0,349}$	$h_3 = 0,156 \tau^{0,254}$
3	158,3	0,13	1,5	$h_3 = 0,115 \tau^{0,383}$	$h_3 = 0,119 \tau^{0,321}$
4	158,3	0,13	0,5	$h_3 = 0,093 \tau^{0,419}$	$h_3 = 0,091 \tau^{0,352}$
5	158,3	0,11	1,0	$h_3 = 0,099 \tau^{0,410}$	$h_3 = 0,102 \tau^{0,339}$
6	158,3	0,26	1,0	$h_3 = 0,110 \tau^{0,424}$	$h_3 = 0,099 \tau^{0,366}$
7	197,8	0,13	1,0	$h_3 = 0,072 \tau^{0,598}$	$h_3 = 0,081 \tau^{0,447}$
				пластины MC111н	пластины MC111у
8	158,3	0,13	1,0	$h_3 = 0,127 \tau^{0,247}$	$h_3 = 0,113 \tau^{0,234}$
9	124,6	0,13	1,0	$h_3 = 0,103 \tau^{0,325}$	$h_3 = 0,078 \tau^{0,302}$
10	158,3	0,13	1,5	$h_3 = 0,165 \tau^{0,261}$	$h_3 = 0,106 \tau^{0,255}$
11	158,3	0,13	0,5	$h_3 = 0,126 \tau^{0,279}$	$h_3 = 0,095 \tau^{0,267}$
12	158,3	0,11	1,0	$h_3 = 0,077 \tau^{0,413}$	$h_3 = 0,067 \tau^{0,387}$
13	158,3	0,26	1,0	$h_3 = 0,096 \tau^{0,391}$	$h_3 = 0,088 \tau^{0,311}$
14	197,8	0,13	1,0	$h_3 = 0,087 \tau^{0,454}$	$h_3 = 0,080 \tau^{0,388}$

Получены степенные зависимости износа по задней поверхности от времени резания для твердых сплавов MC131 и MC111, неупрочненных и упрочненных АДУ, при обработке стали 45, которыми удобно пользоваться для предварительного выбора твердосплавной пластины и назначения режимов резания, а также планирования их ресурсной стойкости. Степенные зависимости износа от времени обработки для твердосплавных пластин MC131 и MC111, неупрочненных и упрочненных АДУ, показывают, что износ пластин, упрочненных АДУ, значительно меньше своих неупрочненных аналогов. При режимах  $v = 197,8$  м/мин;  $s_z = 0,13$  мм/зуб;  $t = 1,0$  мм и времени резания, равном 120 мин, величина износа по задней поверхности для твердосплавной пластины MC131, упрочненной АДУ, равная 0,69 мм, в 1,83 меньше по сравнению с износом неупрочненной твердосплавной пластины MC 131 (износ 1,26 мм).

#### Список использованных источников

1. Способ аэродинамического упрочнения изделий: пат. 21049 Респ. Беларусь, С21D8/00 / А.Н. Жигалов, Г.Ф. Шатуров, В.М. Головков; заявитель А.Н. Жигалов, Г.Ф. Шатуров, В.М. Головков. – № а20131132; заявл. 30.09.13; опубл. 30.06.17 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – № 3. – С. 98.

2. Шелег, В.К. Основы создания и исследование метода аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента / В.К. Шелег, А.Н. Жигалов // Перспективные направления развития технологий машиностроения и металлообработки: материалы 34-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 мар. 2019 г. – Минск, 2019. – С. 184-186.

3. Жигалов, А.Н. Адаптивное управление при совмещенной обработке резанием и ППД / А.Н. Жигалов. – Могилев: МГУП, 2013. – 236 с.

4. Шелег, В.К. Инновации при создании метода аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента / В.К. Шелег, А.Н. Жигалов // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 27-28 мая 2019 г. – Брест, 2019. – С. 51-54.

5. Ящерицын, П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. – Минск: Высшая школа, 1990. – 512 с.

---

#### Информация об авторах

*Шелег Валерий Константинович* – Член-корреспондент НАН Беларуси, профессор, доктор технических наук, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: Sheleh\_v@tut.by.

*Жигалов Анатолий Николаевич* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник МОУВО «Белорусско-Российский университет» (пр. Мира, 43, 212000, г. Могилев, Беларусь), e-mail: jigalov6@mail.ru.

#### Information about the authors

*Sheleg Valery Konstantinovich* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, D. Sc. (Engineering), Belarusian National Technical University (Nezavisimosti Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus), e-mail: Sheleh\_v@tut.by

*Jigalov Anatoly Nikolaevich* – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher of the Belarusian-Russian University (Mira Ave., 43, 212000, Mogilev, Belarus), e-mail: jigalov6@mail.ru.

Поступила в редакцию 30.07.2019 г.