

# ВЕСТНИК

*Белорусско-Российского университета*

*Научно-методический журнал  
Издается с октября 2001 г.*

*Периодичность – 4 раза в год*

3(64) 2019

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

<b>БЕЛАБЕНКО Д. С., АЛЬГИН В. Б.</b> Моделирование переходного процесса гидромеханической передачи с блоком взаимодействующих фрикционов .....	5
<b>ГУСЬКОВ В. В., ПОВАРЕХО А. С.</b> Влияние характеристик опорной поверхности на тягово-сцепные свойства колесных машин .....	15
<b>ГУСЬКОВ В. В., ПОВАРЕХО А. С.</b> Выбор рациональных параметров движителя многоосных колесных машин .....	28
<b>ЖИГАЛОВ А. Н., ЖОЛОБОВ А. А., ШЕЛЕГ В. К.</b> Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из чугуна .....	36
<b>ЛАПТИНСКИЙ В. Н., РОМАНЕНКО А. А., СТЕЦЕНКО В. Ю., БАРАНОВ К. Н.</b> Метод расчета параметров затвердевания отливки при литье направленным затвердеванием от водоохлаждаемого стержня .....	48
<b>ЛУСТЕНКОВА Е. С.</b> Некоторые аспекты изготовления кулачков сферических роликовых передач .....	59
<b>МОРГАЛИК Б. М., ЛЕСКОВЕЦ И. В.</b> Критерии контролепригодности для оценки состояния зубчатых передач .....	67

<b>ПРУДНИКОВ А. П.</b> Передача с фиксированным расположением промежуточных тел качения .....	75
<b>СТАРОВОЙТОВ Н. А.</b> Экспериментальные исследования эффективности поддержания постоянной скорости резания на абразивно-отрезных станках с качающейся шпиндельной бабкой .....	84
<b>ТАРАСИК В. П., ПУЗАНОВА О. В.</b> Методика оценки управляемости и устойчивости автомобиля при движении на вираже .....	93
<b>ХАТЕТОВСКИЙ С. Н., ГРОМЫКО П. Н., ГАЛЮЖИН Д. С., ГАЛЮЖИН М. А.</b> Определение линий контакта зубчатых колес прецессионной передачи при многопарном зацеплении.....	104
<b>ШАТУРОВ Д. Г.</b> Исследование режущей способности твердосплавного лезвийного инструмента при средних скоростях резания .....	112

#### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<b>КОВАЛЬ А. С., ЯШИН В. С., АРТЕМЕНКО А. И.</b> Модель электропривода на базе СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе и регулированием потока .....	121
--	-----

#### ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

<b>КИСЕЛЁВ М. Г., МОНИЧ С. Г., БЕРЕЗНЯК В. Д., СОБОЛЕВ Д. Е., АХМАД АЛИ</b> Методика и аппаратные средства оценки остроты острия хирургических игл.....	129
---	-----

#### СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

<b>МЕЛЬНИК И. В., СОРОХТЕЙ В. М., ПРИСТАВСКИЙ Т. В., ПАРТУТА В. П.</b> Моделирование работы фрагментов монолитных пустотелых плитных железобетонных конструкций в программном комплексе «ЛИРА».....	139
---	-----

#### ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

<b>ПУЗАНОВА Т. В., ШИРОЧЕНКО В. А.</b> Обоснование оперативно-производственного плана на основе методов параметрического синтеза .....	147
--	-----

- Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам
- Публикуемые материалы рецензируются
- Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00014  
для предприятий и организаций – 000142

## CONTENTS

### MECHANICAL ENGINEERING

<b>BELABENKO D. S., ALGIN V. B.</b> Simulation of the shift process in the hydromechanical transmission with interactive clutches .....	5
<b>GUSKOV V. V., POVAREKHO A. S.</b> Effects of soil characteristics on traction and coupling properties of wheeled vehicles .....	15
<b>GUSKOV V. V., POVAREKHO A. S.</b> Selection of rational parameters for the wheel drive of multi-axle wheeled vehicles .....	28
<b>ZHIGALOV A. N., ZHOLOBOV A. A., SHELEG V. K.</b> Study of the impact of the aerodynamic sound hardening method on wear of a carbide tool when milling cast iron materials .....	36
<b>LAPTINSKII V. N., ROMANENKO A. A., STETSENKO V. YU., BARANOV K. N.</b> The method for calculating solidification parameters of a casting during casting by directional solidification from water-cooled rod.....	48
<b>LUSTENKOVA E. S.</b> Certain aspects of manufacturing cams of spherical roller transmissions .....	59
<b>MORGALIK B. M., LESKOVETS I. B.</b> Criteria of controllability for evaluating the condition of gears.....	67
<b>PRUDNIKOV A. P.</b> Transmission with fixed arrangement of intermediate rolling bodies .....	75
<b>STAROVOITOV N. A.</b> Experimental studies of the efficiency of maintaining constant cutting speed on abrasive cut-off machines with a rotating spindle assembly .....	84
<b>TARASIK V. P., PUZANOVA O. V.</b> Methodology for evaluating vehicle controllability and stability when moving around the curve .....	93
<b>KHATETOVSKY S. N., GROMYKO P. N., GALIUZHIN D. S., GALIUZHIN M. A.</b> Determination of contact lines of gear wheels in precessional transmission with multipair toothing .....	104
<b>SHATUROV D. G.</b> Research into cutting ability of cemented carbide edge tools at medium cutting speeds .....	112

### ELECTRICAL ENGINEERING

<b>KOVAL A. S., YASHIN V. S., ARTEMENKO A. I.</b> Model of a PMSM-based electric drive with surface arrangement of magnets on the rotor and flow regulation .....	121
---	-----

**INSTRUMENT MAKING**

**KISELEV M. G., MONICH S. G., BEREZNYAK V. D.,  
SOBOLEV V. D., AHMAD ALI** Technique and hardware for assessing  
sharpness of the tip of surgical needles ..... 129

**CIVIL ENGINEERING. ARCHITECTURE**

**MELNYK I. V., SOROKHTEY V. M., PRYSTAVSKYY T. V.,  
PARTUTA V. P.** Modeling the work of fragments of monolithic hollow  
reinforced concrete slab structures in the LIRA software package ..... 139

**ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES**

**PUZANOVA T. V., SHIROCHENKO V. A.** Justification of the day-  
to-day production plan based on the methods of parametric synthesis ..... 147

Репозиторий БарГУ

УДК 621.923

*А. Н. Жигалов, А. А. Жолобов, В. К. Шелег*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ИЗНОС ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛА ИЗ ЧУГУНА**

UDC 621.923

*A. N. Zhigalov, A. A. Zholobov, V. K. Sheleg*

**STUDY OF THE IMPACT OF THE AERODYNAMIC SOUND HARDENING METHOD ON WEAR OF A CARBIDE TOOL WHEN MILLING CAST IRON MATERIALS**

**Аннотация**

Метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) позволяет существенно повысить стойкость твердосплавного инструмента, работающего с ударными нагрузками. Проведены однофакторные исследования влияния режимов обработки твердосплавными пластинами В35 чугуна СЧ20 на их износ. Экспериментально полученные степенные зависимости износа от пути резания для пластин В35 показывают, что при фрезеровании заготовок из чугуна СЧ20 пластинами, упрочненными методом АДУ, происходит снижение их износа по сравнению с неупрочненными в 1,6...3,5 раза.

**Ключевые слова:**

твердые сплавы, метод аэродинамического звукового упрочнения, износ.

**Abstract**

The method of aerodynamic sound hardening (ADH) considerably increases durability of carbide tools when subjected to impact loads. Single-factor studies of the effects of machining conditions on the wear of B35 carbide inserts when processing SCH20 cast iron have been carried out. The experimentally obtained dependences between the wear and the cutting path for B35 inserts show that when milling workpieces made of SCH20 cast iron with inserts hardened by the ADH method, there is a 1,6...3,5-fold reduction of their wear compared to unhardened ones.

**Keywords:**

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

**Введение**

Работоспособное состояние режущего инструмента (лезвия) представляет собой такое состояние, при котором выполняется обработка резанием при установленных условиях с установленными требованиями, при которых инструмент способен производить обработку резанием с соблюдением определенных условий и требований. Под износом понимают величину, характеризующую изменение формы и размеров режущего инструмента (лезвия)

вследствие изнашивания при резании. Период стойкости любого инструмента зависит от механических и теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, геометрических параметров лезвий инструмента, режимов резания и применяемой смазочно-охлаждающей технологической среды. Важнейшими режимными параметрами процесса резания являются скорость, подача и глубина резания. Стойкость инструмента, в основном связанная с износом режущего клина, представляет собой способность сохра-

нять работоспособным режущее лезвие. Нарушение работоспособного состояния инструмента приводит к его внезапному, когда происходит разрушение инструмента, или постепенному отказу, под которым понимается событие, заключающееся в отклонении от установленных значений хотя бы одного из параметров режущего инструмента, характеризующих его работоспособное состояние, требований или характеристик обработки, выполняемой этим инструментом. Постепенный отказ, характеризующийся достижением критерия затупления, является стойкостным отказом, а постепенный отказ режущего инструмента (лезвия), наступающий после достижения размера, формы или расположения обработанной поверхности предела поля допуска, является точностным отказом.

Наиболее наглядно, причем без осуществления трудоемких исследований, стойкость возможно описать математическими уравнениями. Известные математические уравнения, предназначенные для расчета стойкости инструмента, в производственных условиях требуют компьютерного анализа, при этом цифровые расчеты являются приближенными, особенно при обработке современных материалов и при использовании максимальных параметров обработки.

Эмпирическая модель Арчарда [1] позволяет рассчитать скорость абразивного износа  $C_h$  поверхностей трения в виде

$$C_h = \frac{KWL}{H}^n, \quad (1)$$

где  $K$  – постоянный коэффициент износа;  $W$  – общая нормальная нагрузка;  $L_n$  – путь трения поверхностей;  $H$  – твердость более мягкой поверхности.

Однако модель Арчарда (1), устанавливающая зависимость снятого объема металла в результате абразивного износа от сил трения и служащая для прогнозирования темпов износа с течением

времени, недостаточно полно описывает стойкость инструмента, т. к. не предназначена для высоких скоростей, используемых в настоящее время, и не учитывает влияния температуры на процессы износа.

Модель Тейлора [2] представляет собой зависимость скорости резания  $v$ , при которой стойкость инструмента  $T$  составляла 1 мин:

$$T = \left( \frac{C}{v} \right)^{\frac{1}{m_c}} \quad (2)$$

где  $C$  – постоянная величина;  $m_c$  – показатель относительной стойкости.

Тейлором установлено, что скорость абразивного износа инструмента увеличивается в начале резания, стабилизируется в зоне оптимального износа и резко возрастает в зоне катастрофического износа, вплоть до окончания срока службы инструмента. Логарифмируя уравнение (2), имеем  $m_c \ln T = \ln C - \ln v$ , т. е. в логарифмических координатах зависимость между скоростью резания и периодом стойкости выражается уравнением прямой линии, тангенс угла наклона которой и есть показатель относительной стойкости. Чем больше величина  $m$ , тем выше износостойкость материала режущей части инструмента, и он может работать в более тяжелых условиях.

Модель Тейлора, достаточно хорошо описывающая абразивный износ в зоне оптимального износа, непригодна для прогнозирования при обработке на низких и высоких скоростях резания, а также неприемлема при изменяющейся глубине резания и подачи, точно не описывает процессы при прерывистом резании.

Известна расширенная модель износа Тейлора, учитывающая большее количество переменных ( $v$ ,  $t$ ,  $s_z$ ,  $B$ ,  $D$ ,  $z$  и др.) [3]:

$$T = \left( \frac{C_v D^q}{v t^x s_z^y B^u z^p} K_v \right)^{\frac{1}{m_c}}. \quad (3)$$

Однако уравнение (3) не учитывает геометрического положения режущего инструмента относительно заготовки и контакта вершины инструмента с заготовкой, а также не способно описывать современные технологии и новые процессы резания.

Кроме того, известно, что толщина стружки тесно связана со стойкостью инструмента и представляет собой функцию глубины резания и подачи, измеренную перпендикулярно режущей кромке в плоскости, перпендикулярной направлению резания. Шведский исследователь Серен Хэглунд разработал модель, позволяющую прогнозировать стойкость инструмента через эквивалент толщины стружки. Такая модель учитывает фактор времени, в течение которого кромка взаимодействует с материалом, влияние радиуса вершины инструмента на толщину стружки (модель износа Воксена, согласно которой учитывается толщина стружки по вершине инструмента), изменение по толщине стружки от теоретического значения [4]. Однако учесть такое большое количество изменяющихся и взаимовлияющих факторов, которые описывают модель Хэглунда, возможно с помощью компьютерной обработки. Модель также не учитывает физико-механические свойства материала инструмента.

Модель Колдинга характеризует стойкость инструмента от скорости резания и эквивалентной толщины стружки, учитывая такие факторы, как материал, геометрия инструмента, температура и обрабатываемость заготовки. Данная модель описывается более сложным уравнением, но позволяет точнее оценить влияние различных факторов и условий резания.

Модель Кроненберга [5], в которой предложена зависимость, связывающая между собой температуру резания  $T_p$  и переменные  $(v, s, t)$ , учитывает энергетические и теплофизические параметры контактирующих материа-

лов, включая стойкость инструмента. В [6, 7] использованы степенные зависимости для учета нестационарных процессов резания.

Кроме того, практическое применение сложных теоретических моделей для расчета стойкости инструмента связано с анализом взаимного влияния большого объема многочисленных факторов, что возможно осуществить только с применением компьютерных программ расчета.

Определение стойкости производят методом однофакторного эксперимента. При всех постоянных параметрах резания, кроме одного, проводят экспериментальные исследования по определению зависимости стойкости от изменяющегося параметра. Результаты экспериментов чаще всего обрабатывают графоаналитическим методом. Наиболее точный результат дают экспериментальные модели для конкретного процесса с варьированием многих независимых переменных, действующих на процесс резания, получаемые методом многофакторного планирования эксперимента, но они имеют более сложный характер.

Таким образом, в теории резания большое значение придается исследованиям износа и стойкости режущего инструмента, от величин которых зависят как качественные показатели обработки, так и прочностные характеристики инструмента, посредством моделирования процессов.

### **Основная часть**

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, разработан метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) [8]. 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 [9]. Реализация такого воздействия основана на процессах, протекающих в кристаллической решетке твердых сплавов. На машиностроительных заводах подтверждено повышение стойкости упрочненного твердосплавного инструмента, работающего с ударными нагрузками, в 2 и более раза [10].

Так как метод АДУ является новым, ранее не известным методом, то естественный интерес представляет влияние метода АДУ на стойкость твердосплавного инструмента при различных режимах резания. Результаты некоторых исследований в указанном направлении представлены в статье.

Исследования осуществлялись на пятигранных твердосплавных пластинах формы PNUA-110408 из сплавов В35 (аналог ВК8) производства ОАО «Победит». Пластины размещались в корпусе фрезы таким образом, что главный и вспомогательный углы в плане были соответственно равны  $\varphi = 64^\circ$ ,  $\varphi_1 = 8^\circ$ , передний угол заточки  $\gamma_3 = 10^\circ$ , задний угол заточки  $\alpha_3 = 10^\circ$ . Обработка про-

изводилась на карусельно-фрезерном станке модели ГФ2211 фрезой торцовой диаметром  $d = 63$  мм с установленными на ней пятью пластинами. Обработке подвергались специально изготовленные заготовки размерами  $16 \times 140 \times 25$  мм (ширина  $\times$  длина  $\times$  высота) из чугуновых отливок материала СЧ20 ГОСТ 1412–85 с твердостью НВ 156...170. 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-C фирмы Carl Zeiss с точностью измерений до 0,001 мм.

На рис. 1 и 2 приведены зафиксированные типичные виды износа по задней поверхности  $h_3$  на твердосплавных пластинах при различных времени и режимах резания.

Влияние глубины резания на износ осуществлялось на режимах резания: скорость резания  $v = 124,6$  м/мин, подача на зуб  $s_z = 0,21$  мм/зуб, глубина резания  $t$ , равная 2,0; 3,0 и 4,0 мм. На рис. 3 представлены зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  твердосплавных пластин ВК8, упрочненных АДУ, от пути и глубины резания.

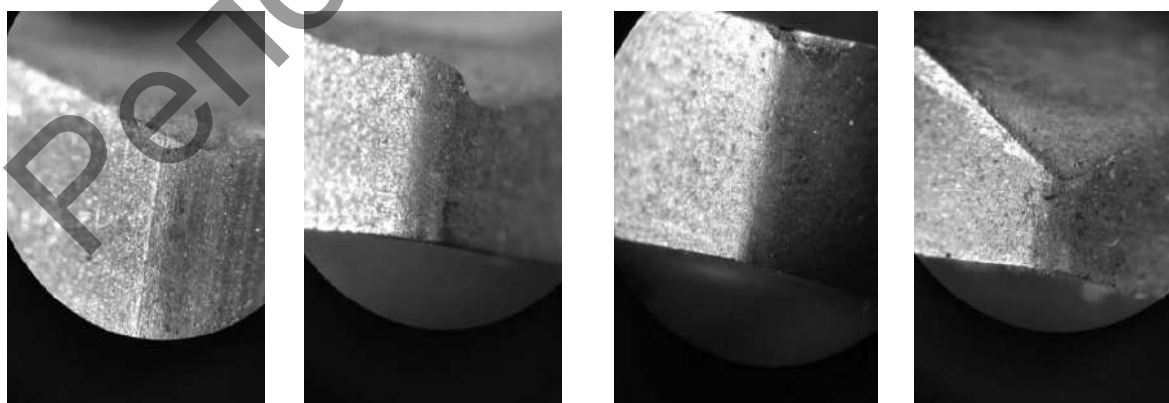


Рис. 1. Виды сколов на задней поверхности для исследуемых твердых сплавов

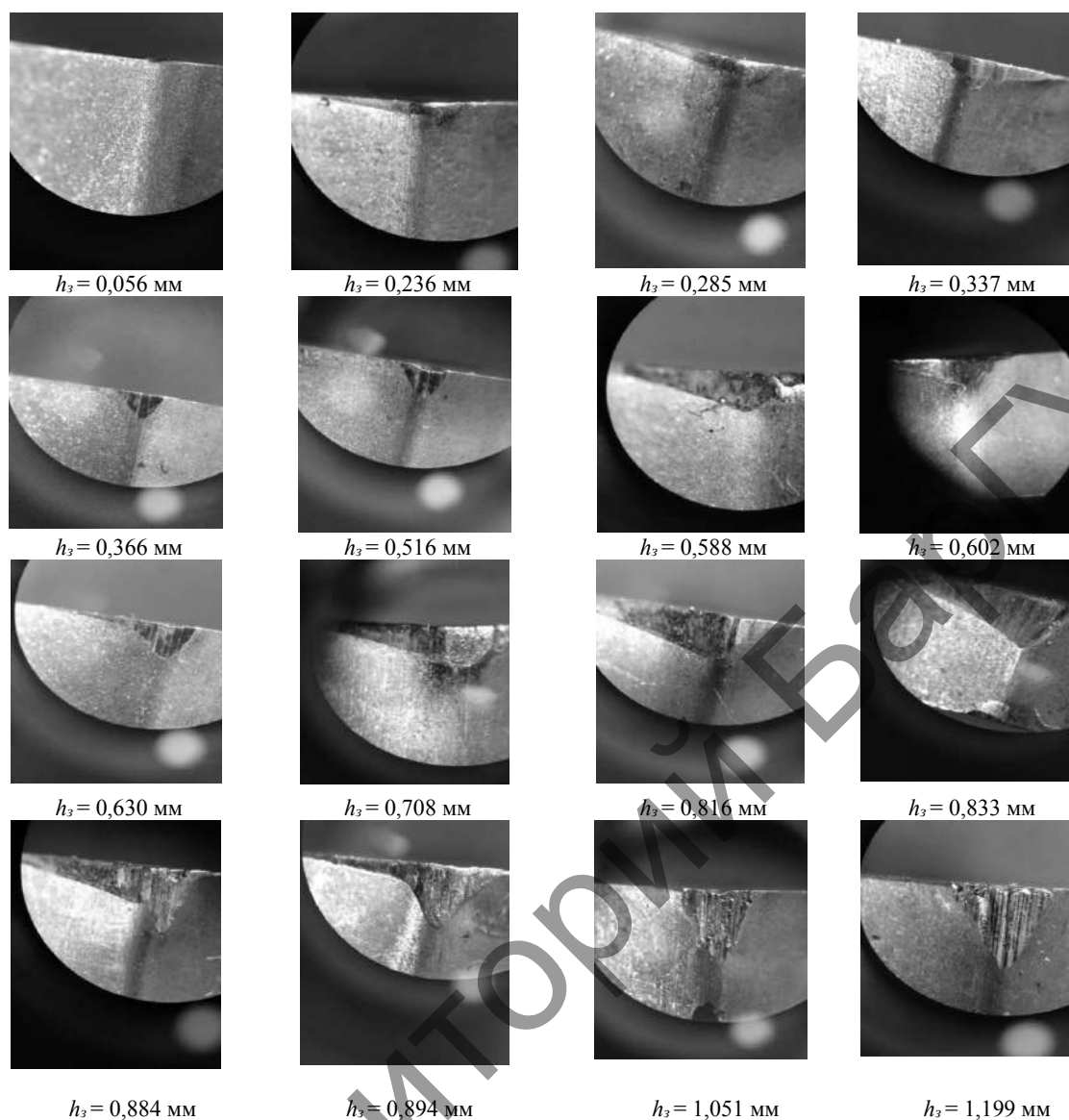


Рис. 2. Типичные виды износа по задней поверхности  $h_3$  для исследуемых твердых сплавов

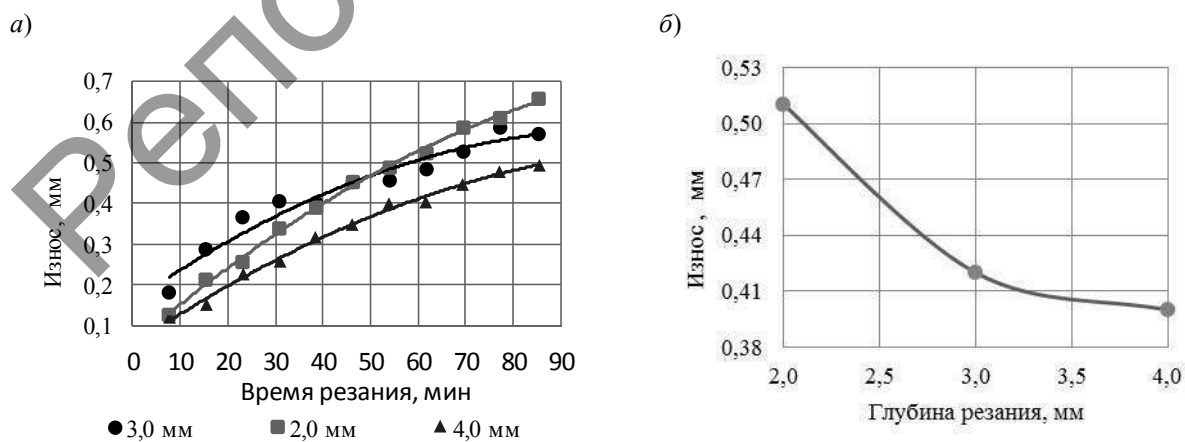


Рис. 3. Зависимость износа задней поверхности  $h_3$  сплава В35, упрочненного АДУ, при фрезеровании на глубинах резания  $t$ , равных 2,0; 3,0 и 4,0 мм, от времени резания (а) и глубины резания (б)

Анализ зависимостей (см. рис. 3) показывает, что для сплава В35, упрочненного АДУ, износ по задней поверхности от пути резания для всех глубин резания носит монотонно увеличивающийся характер без наличия экстремумов, причем в зоне устоявшегося резания с увеличением глубины резания с 2,0 до 4,0 мм уменьшается.

Влияние подачи на износ для сплава В35, упрочненного АДУ, осуществлялось на режимах резания: скорость резания  $v = 124,6$  м/мин, глубина резания  $t = 3,0$  мм, подача на зуб  $s_z$ , равная 0,13; 0,21 и 0,33 мм/зуб. На рис. 4 представлены зависимости износа по задней поверхности  $h_z$  твердосплавных пластин В35, упрочненных АДУ, от времени резания и подачи на зуб.

Из рис. 4 видно, что износ по зад-

ней поверхности  $h_z$  от подачи на зуб в зоне устоявшегося резания имеет явно экстремальный выпуклый характер: с увеличением подачи на зуб от 0,13 до 0,21 мм/зуб износ по задней поверхности увеличивается, при дальнейшем увеличении подачи – уменьшается, причем интенсивность изменения износа при увеличении и уменьшении подачи практически равная.

Исследование влияния скорости резания на износ осуществлялось на режимах резания: глубина резания  $t = 3,0$  мм, подача на зуб  $s_z = 0,21$  мм/зуб, скорость резания  $v$ , равная 98,9; 124,6 и 158,3 м/мин. На рис. 5 представлены зависимости износа по задней поверхности  $h_z$  твердосплавных пластин В35, упрочненных АДУ, от времени резания и скорости резания.

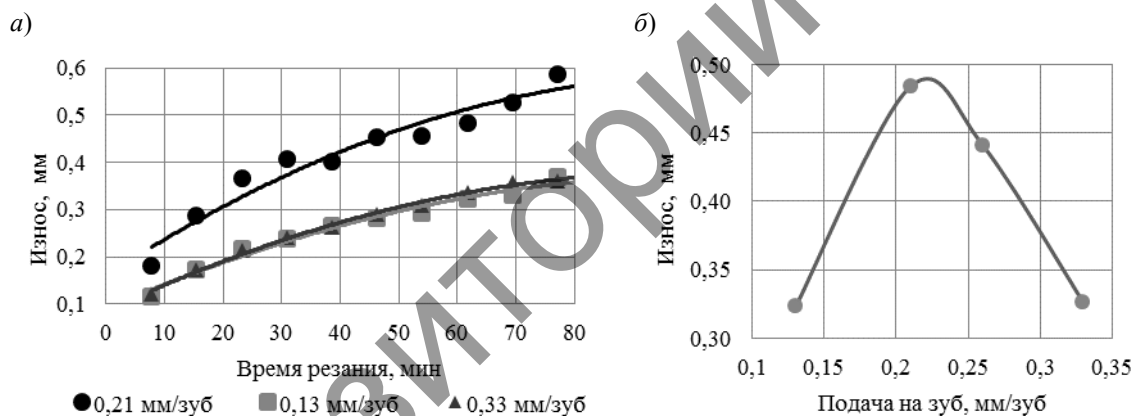


Рис. 4. Зависимость износа задней поверхности  $h_z$  сплава В35, упрочненного АДУ, при фрезеровании на подачах на зуб, равных 0,13; 0,21 и 0,33 мм/зуб, от времени резания (а) и подачи на зуб (б)

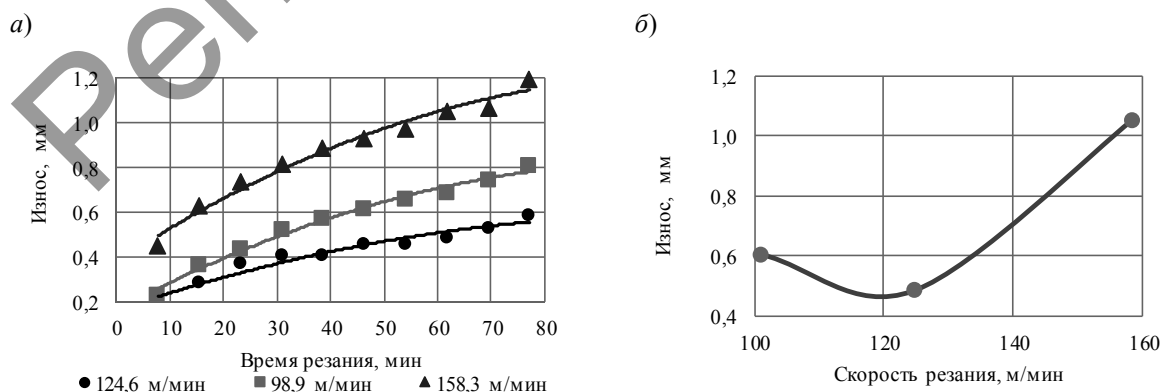


Рис. 5. Зависимость износа задней поверхности  $h_z$  сплава В35, упрочненного АДУ, при фрезеровании на скоростях резания, равных 98,9; 124,6 и 158,3 м/мин, от времени резания (а) и скорости резания (б)

Из анализа рис. 5 следует, что износ по задней поверхности  $h_3$  от скорости в зоне устоявшегося резания имеет явно экстремальный, причем вогнутый, характер. Минимальный экстремум износа наблюдается при скорости резания  $v = 105 \dots 125$  м/мин.

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 [11]

$$h_3 = a \cdot \tau^n, \quad (4)$$

где  $a$  – постоянная величина, характеризующая интенсивность износа от времени (показатель абсолютной величины износа);  $n$  – постоянная величина, представляющая собой в логарифмических координатах тангенс угла наклона кривой, описывающей зависимость износа от времени – показатель интенсивности величины износа.

Показатели  $a$  и  $n$  связывают между собой величину износа  $h_3$  и время  $\tau$ . После логарифмирования уравнение примет следующий вид:

$$\lg h_3 = \lg a + n_o \lg \tau. \quad (5)$$

В зависимости (5) показатель относительной стойкости  $n_o$  равен тангенсу угла  $\alpha$  наклона прямой линии, полученной из кривой износа, построенной в логарифмической системе:

$$n_o = \operatorname{tg} \alpha = \frac{h_{3_i} - h_{3_1}}{\tau_i - \tau_1}, \quad (6)$$

где  $h_{3_i}$  и  $h_{3_1}$  – значения износа в логарифмической системе координат в  $i$ -й и первой точках соответственно;  $\tau_i$  и  $\tau_1$  – значения времени в логарифмической системе координат в  $i$ -й и первой точках

соответственно.

Коэффициент  $a$  из (4) определяется как

$$a = \frac{h_{3_i}}{2\tau_i^{n_o}} + \frac{h_{3_1}}{2\tau_1^{n_o}}. \quad (7)$$

Однофакторные исследования (см. рис. 3–5) 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  $t$ . В связи с этим принималось количество вариационных параметров обработки, равное трем –  $v$ ,  $s$  и  $t$ . Проведены многофакторные исследования на основании плана полнофакторного эксперимента, состоящего из семи опытов, для каждого материала. Назначался диапазон вариации для каждого параметра исходя из данных однофакторных исследований с использованием рекомендаций литературы, а также с учетом возможности установки на станке реальных режимов резания. Используемые режимы резания для сплава В35 представлены в табл. 1.

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 оно исключалось из расчетов. Среднее значение пересчитывалось по оставшимся значениям. Замеры износа по задней поверхности  $h_3$  производились через каждые 100 м пути резания  $L_p$ . Для каждого опыта строились графики изменения износа от пути резания для зоны устоявшегося резания в абсолютной и логарифмической системах. Причем логарифмировались значения величин износа и времени по десятичному логарифму. В качестве примера на рис. 6 показаны для первого опыта

зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  твердосплавных пластин В35, упрочненных методом АДУ и неупроч-

ненных, от пути резания при фрезеровании чугуна СЧ20.

Табл. 1. Вариации режимов обработки для пластин В35 при фрезеровании заготовок из чугуна СЧ20

Номер опыта	$v_{\phi}$ , м/мин	$s_z$ , мм/об	$t$ , мм	$n_{\phi}$ , об/мин	$s_{cm}$ , мм/об
1	124,6	0,21	3,0	630	800
2	98,9	0,21	3,0	500	630
3	124,6	0,21	4,0	630	800
4	124,6	0,21	2,0	630	800
5	124,6	0,13	3,0	630	500
6	124,6	0,33	3,0	630	1250
7	158,3	0,21	3,0	800	1000

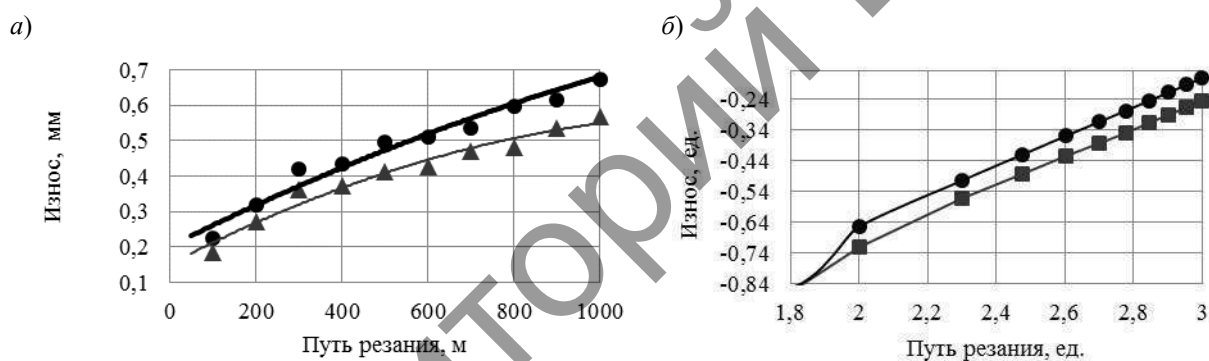


Рис. 6. Зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  твердосплавных пластин В35, упрочненных методом АДУ и неупрочненных, от пути резания при фрезеровании чугуна СЧ20 в абсолютной (а) и логарифмической (б) системах для первого опыта

Графики, построенные по семи опытам, аналогично рис. 6, обрабатывались следующим образом. На графиках, построенных в логарифмической системе, замерялись значения координат для начальной и конечной точек, между которыми соблюдалась прямолинейность линии. Например, для первого опыта в логарифмической системе координаты кривой, соответствующей неупрочненному сплаву, для первой точки  $L_p = 2,6021$ ;  $h_{31} = -0,36051$ . Для седьмой

точки  $L_7 = 3,0000$ ;  $h_{37} = -0,1713$ . Затем на графиках в абсолютной системе определялись координаты для аналогичных точек:  $L_1 = 400$  м;  $h_{31} = 0,436$  мм;  $L_7 = 1000$  м;  $h_{37} = 0,674$  мм. Результаты координат для всех опытов сведены в табл. 2, в которой также приведены расчеты коэффициентов  $n_0$ ,  $a$ , определенных по формулам (6) и (7), а также коэффициентов повышения стойкости  $K_c$  упрочненных АДУ пластин относительно неупрочненных.

Табл. 2. Результаты расчетов коэффициентов для зависимостей износа от пути резания  $L_p$  и коэффициентов повышения стойкости для пластин сплава В35

Координаты	Номер точки		$h_{z1}$	$h_{z2}$	$L_1$	$L_i$	$n_0$	$a$	$T$ , мин, при $h_3$		
									0,6	0,8	1,0
<b>Опыт 1</b>											
В35 неупрочненные											
Логарифмические	1	7	-0,3605	-0,1713	2,6021	3,0000	<b>0,475</b>				
Абсолютные	1	7	0,436	0,674	400	1000		<b>0,025</b>	782,9	1433,8	2292,4
В35, упрочненные АДУ											
Логарифмические	1	7	-0,4271	-0,2464	2,6021	3,0000	<b>0,454</b>				
Абсолютные	1	7	0,374	0,467	400	1000		<b>0,022</b>	1388,0	2615,1	4274,5
Коэффициент повышения стойкости $K_c$									1,77	1,82	1,86
<b>Опыт 2</b>											
В35 неупрочненные											
Логарифмические	1	7	-0,1599	-0,0461	2,6021	3,0000	<b>0,286</b>				
Абсолютные	1	7	0,692	1,1120	400	1000		<b>0,139</b>	164,3	449,3	980,4
В35, упрочненные АДУ											
Логарифмические	1	7	-0,3028	-0,0953	2,6021	3,0000	<b>0,521</b>				
Абсолютные	1	7	0,498	0,803	400	1000		<b>0,022</b>	571,8	992,8	1522,9
Коэффициент повышения стойкости $K_c$									3,48	2,21	1,56
<b>Опыт 3</b>											
В35 неупрочненные											
Логарифмические	1	7	0,0269	0,1987	2,6021	3,0000	<b>0,432</b>				
Абсолютные	1	7	1,064	1,580	400	1000		<b>0,080</b>	106,2	206,7	346,6
В35, упрочненные АДУ											
Логарифмические	1	7	-0,0980	-0,0620	2,6021	3,0000	<b>0,402</b>				
Абсолютные	1	7	0,798	1,154	400	1000		<b>0,072</b>	196,7	402,3	700,7
Коэффициент повышения стойкости $K_c$									1,85	1,95	2,02
<b>Опыт 4</b>											
В35 неупрочненные											
Логарифмические	1	7	-0,4647	-0,2741	2,6021	3,0000	<b>0,479</b>				
Абсолютные	1	7	0,343	0,532	400	1000		<b>0,019</b>	1285,4	2343,6	3734,1
В35, упрочненные АДУ											
Логарифмические	1	7	-0,6271	-0,4461	2,6021	3,0000	<b>0,455</b>				
Абсолютные	1	7	0,256	0,358	400	1000		<b>0,016</b>	2840,2	5345,7	8730,6
Коэффициент повышения стойкости $K_c$									2,21	2,28	2,34
<b>Опыт 5</b>											
В35 неупрочненные											
Логарифмические	1	7	-0,4815	-0,2692	2,6021	3,0000	<b>0,534</b>				
Абсолютные	1	7	0,330	0,538	400	1000		<b>0,013</b>	1226,7	2103,3	3195,4
В35, упрочненные АДУ											
Логарифмические	1	7	-0,6198	-0,4248	2,6021	3,0000	<b>0,490</b>				
Абсолютные	1	7	0,240	0,376	400	1000		<b>0,013</b>	2594,8	4667,1	7358,5
Коэффициент повышения стойкости $K_c$									2,12	2,22	2,30

Окончание табл. 2

Координаты	Номер точки		$h_{z1}$	$h_{z2}$	$L_1$	$L_i$	$n_0$	$a$	$T$ , мин, при $h_z$		
									0,6	0,8	1,0
<b>Опыт 6</b>											
В35 неупрочненные											
Логарифмические	1	7	-0,2840	-0,0521	2,6021	3,0000	<b>0,583</b>				
Абсолютные	1	7	0,520	0,887	400	1000		<b>0,016</b>	511,3	837,7	1228,4
В35, упрочненные АДУ											
Логарифмические	1	7	-0,4763	-0,2069	2,6021	3,0000	<b>0,677</b>				
Абсолютные	1	7	0,334	0,621	400	1000		<b>0,006</b>	950,3	1453,5	2020,9
Коэффициент повышения стойкости $K_c$									1,86	1,74	1,65
<b>Опыт 7</b>											
В35 неупрочненные											
Логарифмические	1	7	-0,4283	-0,1701	2,6021	3,0000	<b>0,649</b>				
Абсолютные	1	7	0,373	0,676	400	1000		<b>0,008</b>	832,1	1296,4	1828,4
В35, упрочненные АДУ											
Логарифмические	1	7	-0,5800	-0,3134	2,6021	3,0000	<b>0,670</b>				
Абсолютные	1	7	0,263	0,486	400	1000		<b>0,005</b>	1369,7	2104,2	2935,9
Коэффициент повышения стойкости $K_c$									1,65	1,62	1,61

Коэффициент повышения стойкости  $K_c$  определялся по формуле

$$K_c = \frac{T_y}{T_n}, \quad (8)$$

где  $T_y$  и  $T_n$  – значения стойкости пластин, упрочненных АДУ и неупрочненных соответственно.

Анализ данных табл. 2 показывает, что твердосплавные пластины В35, упрочненные методом АДУ, в диапазоне исследуемых режимов резания превышают по стойкости неупрочненные пластины В35 в 1,6...3,5 раза. При этом с повышением величины допустимого износа пластины, что регламентируется технологическими параметрами (для чи-

стовой обработки) или прочностью пластины (для черновой обработки), коэффициент повышения стойкости  $K_c$  для одних режимов резания увеличивается, для других – уменьшается. В связи с этим комбинация режимов резания оказывает существенное влияние на стойкость твердосплавных пластин В35, как неупрочненных, так и упрочненных АДУ, и, следовательно, существуют оптимальные режимы резания.

Исходя из данных табл. 2 зависимости износа по задней поверхности  $h_z$  от пути резания  $L_p$  при режимах резания, приведенных в табл. 1, после обработки по формуле (4) примут вид степенных функций, значения которых приведены в табл. 3.

Табл. 3. Зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  от пути резания  $L_p$  для твердосплавных пластин В35 при фрезеровании чугуна СЧ20

Номер опыта	Режим резания			Зависимость износа по задней поверхности от времени		Снижение износа при АДУ на $L_p = 400$ м, %
	$v$ , м/мин	$s_z$ , мм/об	$t$ , мм	Пластины В35Н	Пластины В35У	
1	124,6	0,21	3,0	$h_3 = 0,025 L_p^{0,475}$	$h_3 = 0,022 L_p^{0,454}$	22,4
2	98,9	0,21	3,0	$h_3 = 0,139 L_p^{0,286}$	$h_3 = 0,022 L_p^{0,521}$	35,3
3	124,6	0,21	4,0	$h_3 = 0,080 L_p^{0,432}$	$h_3 = 0,072 L_p^{0,402}$	24,8
4	124,6	0,21	2,0	$h_3 = 0,019 L_p^{0,479}$	$h_3 = 0,016 L_p^{0,455}$	27,1
5	124,6	0,13	3,0	$h_3 = 0,013 L_p^{0,534}$	$h_3 = 0,013 L_p^{0,49}$	23,2
6	124,6	0,33	3,0	$h_3 = 0,016 L_p^{0,583}$	$h_3 = 0,006 L_p^{0,677}$	34,1
7	158,3	0,21	3,0	$h_3 = 0,008 L_p^{0,649}$	$h_3 = 0,005 L_p^{0,67}$	29,1

### Заключение

1. Однофакторные экспериментальные исследования обработки чугуна СЧ20 твердосплавными пластинами В35, упрочненными аэродинамическим звуковым методом, показали, что износ по задней поверхности в зависимости от пути резания при изменении глубины резания носит монотонно увеличивающийся характер без наличия экстремумов, причем в зоне устоявшегося резания с увеличением глубины резания с 2,0 до 4,0 мм уменьшается. Износ по задней поверхности от подачи на зуб в зоне устоявшегося резания имеет явно экстремальный выпуклый характер: с увеличением подачи на зуб от 0,13 до 0,21 мм/зуб износ по задней поверхности увеличивается, при дальнейшем увеличении подачи — уменьшается, причем интенсивность роста износа при увеличении и уменьшении подачи практически равная. Износ по задней поверхности от скорости резания в зоне

устоявшегося резания имеет явно экстремальный, причем вогнутый, характер. Минимальный экстремум износа наблюдается при скорости резания  $v = 105 \dots 125$  м/мин.

2. Полученные степенные зависимости износа от пути резания для твердосплавных пластин В35, неупрочненных и упрочненных АДУ, показывают, что износ пластин, упрочненных АДУ, значительно меньше износа неупрочненных, на что указывают коэффициенты  $a$  и  $n_0$ , несущие количественную оценку износа. Например, при пути резания, равном 400 м, износ пластин сплава В35 при фрезеровании чугуна СЧ20 меньше на 22,4...35,3 %, чем износ неупрочненных пластин В35.

3. Полученные зависимости износа по задней поверхности от пути резания удобно использовать для предварительного выбора твердосплавной пластины и назначения режимов резания, а также для количественной оценки и назначения допустимой величины износа.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. — Москва: Машиностроение, 1977. — 526 с.
2. Кожевников, Д. В. Резание материалов: учебник / Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов; под общ. ред. С. В. Кирсанова. — Москва: Машиностроение, 2007. — 304 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва: Машиностроение, 1985. — Т. 2. — 496 с.

4. **Патрик де Вос.** Развитие математических моделей толщины стружки, образующейся при фрезеровании / Патрик де Вос // Производственный журнал по металлообработке. – 2016. – № 5. – С. 38–41.
5. **Мигранов, М. Ш.** Изнашивание инструмента в условиях нестационарности процесса точения при изготовлении деталей ГТД: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. Ш. Мигранов. – Уфа, 1995. – 14 с.
6. **Армарего, И. Дж. А.** Обработка материалов резанием / И. Дж. А. Армарего, Р. Х. Браун. – Москва: Машиностроение, 1977. – 325 с.
7. Резание труднообрабатываемых материалов / Под ред. П. Г. Петрухи. – Москва: Машиностроение, 1972. – 616 с.
8. Способ аэродинамического упрочнения изделий: пат. ВУ 21049 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков. – Оpubл. 30.06.2017.
9. **Жигалов, А. Н.** Адаптивное управление при совмещенной обработке резанием и ППД / А. Н. Жигалов. – Могилев: МГУП, 2013. – 236 с.
10. **Жигалов, А. Н.** Влияние износа твердых сплавов, упрочненных аэродинамическим воздействием, на шероховатость обработанной поверхности при фрезерно-карусельном резании / А. Н. Жигалов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 3 (56). – С. 5–15.
11. **Шатуров, Д. Г.** Технологические особенности чистовой токарной обработки валов / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров, А. А. Жолобов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – 192 с.

*Статья сдана в редакцию 5 июля 2019 года*

**Анатолий Николаевич Жигалов**, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет. E-mail: jigalov6@mail.ru.

**Александр Алексеевич Жолобов**, канд. техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. E-mail: BRU\_AA@mail.ru.

**Валерий Константинович Шелег**, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Беларуси, Белорусский национальный технический университет. E-mail: Sheleh\_v@tut.by.

**Anatoly Nikolayevich Zhigalov**, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University. E-mail: jigalov6@mail.ru.

**Aleksandr Alekseyevich Zholobov**, PhD (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: BRU\_AA@mail.ru.

**Valery Konstantinovich Sheleg**, DSc (Engineering), Prof., Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Republic of Belarus, Belarusian National Technical University. E-mail: Sheleh\_v@tut.by.