ISSN 2782-5957

№7
2026



ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

С 2004 г. по 2021 г. – журнал «Вестник Брянского государственного технического университета»;
С 2022 г. – журнал «Транспортное машиностроение»

№ 7(55) 2026

ISSN: 2782-5957
DOI: 10.30987/2782-5957-2026-7
Журнал выходит ежемесячно

Председатель редакционного совета – **Федонин О.Н.,** *д-р техн. наук, проф.*
Заместитель председателя редакционного совета – **Нагоркин М.Н.,** *д-р техн. наук, доц.*

Редакционный совет:
Агеев Е.В., *д-р техн. наук, проф., (Курск)*
Агуреев И.Е., *д-р техн. наук, проф., (Тула)*
Албагачиев А.Ю., *д-р техн. наук, проф., (Москва)*
Антипин Д.Я., *канд. техн. наук, доц., (Брянск)*
Анцев В.Ю., *д-р техн. наук, проф., (Тула)*
Безъязычный В.Ф., *д-р техн. наук, проф., (Рыбинск)*
Бишутин С.Г., *д-р техн. наук, проф., (Брянск)*
Буяновский И.А., *д-р техн. наук, (Москва)*
Вайнер Л.Г., *д-р техн. наук, проф., (Хабаровск)*
Волохов Г.М., *д-р техн. наук, проф., (Коломна)*
Горленко А.О., *д-р техн. наук, проф., (Брянск)*
Дорохин С.В., *д-р техн. наук, доц., (Воронеж)*
Киричек А.В., *д-р техн. наук, проф., (Брянск)*
Космодамианский А.С., *д-р техн. наук, проф., (Москва)*
Куц В.В., *д-р техн. наук, проф., (Курск)*
Макаренко К.В., *д-р техн. наук, проф., (Брянск)*
Макаров В.Ф., *д-р техн. наук, проф., (Пермь)*
Мокрицкий Б.Я., *д-р техн. наук, проф., (Комсомольск-на-Амуре)*
Петрешин Д.И., *д-р техн. наук, доц., (Брянск)*
Подмастерьев К.В., *д-р техн. наук, проф., (Орел)*
Пугачев А.А., *д-р техн. наук, доц., (Брянск)*
Рассоха В.И., *д-р техн. наук, доц., (Оренбург)*
Савин Л.А., *д-р техн. наук, проф., (Орел)*
Смоленцев В.П., *д-р техн. наук, проф., (Воронеж)*
Соловьев Д.Л., *д-р техн. наук, проф., (Муром)*
Степанов Ю.С., *д-р техн. наук, проф., (Орел)*
Суслов А.Г., *д-р техн. наук, проф., (Брянск)*
Трушников Д.Н., *д-р техн. наук, (Пермь)*
Туричин Г.А., *д-р техн. наук, проф., (Санкт-Петербург)*
Хейфец М.Л., *д-р техн. наук, проф., (Минск, Беларусь)*
Химухин С.Н., *д-р техн. наук, проф., (Хабаровск)*
Шалыгин М.Г., *д-р техн. наук, доц.(Брянск)*
Шантаренко С.Г., *д-р техн. наук, доц., (Омск)*
Янюшкин А.С., *д-р техн. наук, проф., (Чебоксары)*

Редколлегия:
Главный редактор – **Хандожко А.В.,** *д-р техн. наук, проф.*
Зам. главного редактора – **Антипин Д.Я.,** *канд. техн. наук*
Зам. главного редактора – **Съянов С.Ю.,** *канд. техн. наук*
Отв. секретарь – **Татаринцев В.А.,** *канд. техн. наук*
Редактор – **Лакалина Н.Ю.**
Ведущий инженер – **Ерохина В.А.**

Адрес редакции:
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
Телефон: +7 (4832) 58-82-77
Сайт: tu-bryansk.ru/info/zhurnaly
E-mail: trans-eng@tu-bryansk.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Серия ПИ № ФС77-75522 от 12 апреля 2019 года

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении или непосредственно в редакции журнала. Подписной индекс по интернет-каталогу "Пресса по подписке": Э80859.

Журнал включен в специализированный библиографический сервис CrossRef

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (категория К2) по группам научных специальностей: 2.5. Машиностроение (2.5.2; 2.5.3; 2.5.5; 2.5.6; 2.5.8), 2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия (2.6.1; 2.6.17), 2.9. Транспортные системы (2.9.1; 2.9.3; 2.9.5).

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Транспортное машиностроение», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

© Брянский государственный технический университет, 2026

TRANSPORT ENGINEERING

SCIENTIFIC TECHNICAL JOURNAL

From 2004 to 2021 - the journal "Bulletin of the Bryansk State Technical University";
Since 2022 - the journal "Transport engineering".

№ 7(55) 2026

ISSN: 2782-5957
DOI: 10.30987/2782-5957-2026-7
Journal is published monthly

Chairman of Editorial Council – **O.N. Fedonin,** *D.Eng., Prof.*
Vice-Chairman of Editorial Council – **M.N. Nagorkin,** *D.Eng., Prof.*

Editorial Council:
E.V. Ageev, *D.Eng., Prof., (Kursk)*
I.E. Agureev, *D.Eng., Prof., (Tula)*
A.Yu. Albagachiev, *D.Eng., Prof., (Moscow)*
D.Ya. Antipin, *Can.Eng., Ass. Prof., (Bryansk)*
V.Yu. Antsev, *D.Eng., Prof., (Tula)*
V.F. Bezyazychny, *D.Eng., Prof., (Rybinsk)*
S. G. Bishutin, *D.Eng., Prof., (Bryansk)*
I. A. Buyanovsky, *D.Eng., (Moscow)*
S.V. Dorokhin, *D.Eng., Ass. Prof., (Voronezh)*
A.O. Gorlenko, *D.Eng., Prof., (Bryansk)*
M.L. Kheifits, *D.Eng., Prof., (Minsk, Belarus)*
S.N. Khimukhin, *D.Eng., Prof., (Khabarovsk)*
A.V, Kirichek, *D.Eng., Prof., (Bryansk)*
A.S. Kosmodamianskiy, *D.Eng., Prof.,* (*Moscow)*
V.V. Kuts, *D.Eng., Prof.,* (*Kursk)*
K.V. Makarenko, *D.Eng., Prof., (Bryansk)*
V.F. Makarov, *D.Eng., Prof., (Perm)*
B.Ya. Mokritsky, *D.Eng., Prof., (Komsomolsk-upon Amur)*
D.I. Petreshin, *D.Eng., Ass. Prof., (Bryansk)*
K.V. Podmasteryev, *D.Eng., Prof., (Orel)*
A.A. Pugachev, *D.Eng., Ass. Prof., (Bryansk)*
V.I. Rassoha, *D.Eng., Ass. Prof., (Orenburg)*
L.A. Savin, *D.Eng., Prof., (Orel)*
M.G. Shalygin, *D.Eng., Ass. Prof., (Bryansk)*
S.G. Shantarenko, *D.Eng., Ass. Prof., (Omsk)*
V.P. Smolentsev, *D.Eng., Prof., (Voronezh)*
D.L. Solovyov, *D.Eng., Prof., (Murom)*
Yu.S. Stepanov, *D.Eng., Prof., (Orel)*
A.G. Suslov, *D.Eng., Prof., (Bryansk)*
D.N. Trushnikov, *D.Eng., (Perm)*
G.A. Turichin, *D.Eng., Prof., (St. Petersburg)*
L.G. Vainer, *D.Eng., Prof., (Khabarovsk)*
G.M. Volokhov, *D.Eng., Prof., (Kolomna)*
A.S. Yanyushkin, *D.Eng., Prof., (Cheboksary)*

Editorial Board:
Editor-in-Chief – **A.V. Khandozhko**, *D.Eng., Prof.*
Deputy Editor-in-Chief – **D.Ya. Antipin,** *Can. Eng*
Deputy Editor-in-Chief – **S.Yu. Syanov,** *Can. Eng*
Executive Secretary – **V.A. Tatarintsev***, Can. Eng.*
Editor – **N.Yu. Lakalina**
Leading engineer – **V.A. Yerokhina**

Editorial Office Address:
7, 50 years of October Boulevard, Bryansk, 241035, Russia
Phone: +7 (4832) 58-82-77
Site: tu-bryansk.ru/info/zhurnaly
E-mail: trans-eng@tu-bryansk.ru

The journal is registered in the Federal Service for supervision of communications, information technologies and mass media. Series PI No. FS77 - 75522 of April 12, 2019

A journal is spread through a subscription which may be drawn up in any post-office or directly in the editorial office of the journal. Subscription index in the Internet-catalog "Press by Subscription": E80859.

Journal is included in a specialized bibliographical service CrossRef

Reprinting, all kinds of material copying and reproduction of materials published in the journal “Transport engineering” is allowed only with the Editorial Board’s permission and a reference to the source of information

© Bryansk State Technical University, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение

Евдокимов Е.В., Макашин Д.С., Капустьян М.Ф. Использование параметризации для повышения эффективности разработки технической документации в машиностроении — 4

Реутов А.А. Оценка влияние овальности барабана на работу ленточного конвейера — 18

Бочкарев П.Ю., Долгов А.Б., Никифоров А.А. Разработка методики графоаналитического описания заготовки детали типа «валик» для создания цифрового двойника в технологической подготовке производства — 31

Зверовщиков А.Е., Кошелева Ю.Н., Артамонов Д.В., Гурин П.А., Петрякова А.А. Системный подход к обеспечению качества обработки при глубинном шлифовании твердосплавного режущего инструмента профильными алмазными кругами — 41

Транспортные системы

Подолинная С.Д., Король Р.Г. Разработка аналитической модели многокритериальной оценки мест размещения транспортно-логистических объектов — 51

Щепалин Д.Е., Сладкова Л.А. 3D-моделирование усилий в рабочем оборудовании отвала бульдозера с выдвижными секциями — 62

Материаловедение и технологии материалов

Мордовина Ю.С. Влияние микроструктурного состояния трубной стали на ее склонность к коррозионному растрескиванию под напряжением — 72

Инженерная мысль России: личности, идеи, разработки

Попков В.И. Борис Вячеславович Калинский (к 120-летию со дня рождения) — 82

CONTENTS

Mechanical engineering

E.V. Evdokimov, D.S. Makashin, M.F. Kapustyan. Using parameterization to enhance the efficiency of developing technical documents in mechanical engineering — 4

A.A. Reutov. Assessment of the impact of the pulley ovality on the operation of belt conveyor — 18

P.Yu. Bochkarev, A.B. Dolgov, A.A. Nikiforov. Development of a technique for graphoanalytical description of the workpiece of a roller-type part for creating a digital twin in production planning — 31

A.E. Zverovshchikov, Yu.N. Kosheleva, D.V. Artamonov, P.A. Gurin, A.A. Petryakova. Systems approach to ensuring the quality of machining during deep grinding of carbide cutting tools with profiled diamond wheels — 41

Transport systems

S.D. Podolinnaya, R.G. Korol. Development of an analytical model for multicriteria assessment of the location of transport and logistics facilities — 51

D.E. Shchepalin, L.A. Sladkova. 3D modeling of forces in work equipment of bulldozer blades with extendable sections — 62

Materials science and materials technology

Yu.S. Mordovina. Influence of the microstructural composition of pipe steel on its tendency to corrosion and stress cracking — 72

Russian engineering: personalities, ideas, developments

V.I. Popkov. Boris Vyacheslavovich Kalinsky (to the 120th anniversary of his birth) — 82

Транспортное машиностроение. 2026. № 7(55). С. 41-50. ISSN 2782-5957 (print)
Transport Engineering. 2026. no. 7(55). P. 41-50. ISSN 2782-5957 (print)

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.923
doi: 10.30987/2782-5957-2026-7-41-50

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПРИ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ ТВЕРДОСПЛАВНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРОФИЛЬНЫМИ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ

Александр Евгеньевич Зверовщиков[1]✉, Юлия Николаевна Кошелева[2], Дмитрий Владимирович Артамонов[3], Павел Александрович Гурин[4], Анастасия Алексеевна Петрякова[5]

[1-5] Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
[1] azwer@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-7827-7462
[2] j231@mail.ru
[3] rector@pnzgu.ru; https://orcid.org/0000-0002-3240-7222
[4] sbgurin_pavel@list.ru
[5] petryak0va_n255@mail.ru

Аннотация

Глубинное шлифование профильными алмазными кругами является высокопроизводительным методом обработки. Данный метод применяется для обработки широкой номенклатуры твердосплавных изделий. Однако, поскольку при глубинном шлифовании весь припуск удаляется за один рабочий ход, процесс характеризуется повышенным тепловыделением. Высокие температуры в зоне обработки сказываются негативным образом на качестве изделий. Ограничить негативное влияние теплонапряженности процесса обработки можно путем подбора рациональных режимов шлифования. Целью работы является обеспечение качества обработки при глубинном шлифовании твердосплавного режущего инструмента профильными алмазными кругами на основе системного подхода. Процесс глубинного шлифования рассматривался с точки зрения двух ограничивающих условий - засаливания алмазного круга и теплонапряженности процесса. Управляющие факторы – скорость подачи детали, глубина шлифования и выбор СОЖ. На основе прочностных характеристик твердого сплава введен критерий трещинообразования - коэффициент интенсивности напряжений. Разработан алгоритм назначения рациональных режимов шлифования на основе анализа условий сохранения режущей способности круга и моделирования тепловых полей и температурных напряжений. Проведена технологическая подготовка операции профильного шлифования, назначены режимы обработки твердосплавной концевой фрезы, выполнено конечно-элементное моделирование тепловых процессов в зоне обработки и проанализирована возможная дефектность обработанной поверхности. Предложена методика выявления наиболее опасных для появления дефектов зон профиля исходя из градиента температур и температурных напряжений на разных участках профиля. Предложенный алгоритм определения режимов профильного глубинного алмазного шлифования твердых сплавов обеспечивает достижение качественных параметров изделия при высокой производительности процесса шлифования.

Ключевые слова: шлифование, засаливание круга, скорость, подача, деталь, СОЖ, напряжение, моделирование.

Финансирование: Работа выполнена в рамках Федерального проекта «Наука и кадры для производства средств производства и автоматизации» при выполнении ПНИ «Исследование процесса формирования поверхностного слоя из карбида вольфрама на металлических деталях и разработка метода обеспечения высокого ресурса нагруженных деталей и упрочнения режущего инструмента для производства высоконагруженных элементов конструкций» (FSGE-2026-0026).

Ссылка для цитирования:
Зверовщиков А.В. Системный подход к обеспечению качества обработки при глубинном шлифовании твердосплавного режущего инструмента профильными алмазными кругами / А. Е. Зверовщиков, Ю.Н. Кошелева, Д.В. Артамонов, П.А. Гурин, А.А. Петрякова // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 7. – С. 41-50. doi: 10.30987/2782-5957-2026-7-41-50.

© Зверовщиков А. Е., Кошелева Ю. Н., Артамонов Д. В., Гурин П. А., Петрякова А. А., 2026

Original article
Open Access Article

SYSTEMS APPROACH TO ENSURING THE QUALITY OF MACHINING DURING DEEP GRINDING OF CARBIDE CUTTING TOOLS WITH PROFILED DIAMOND WHEELS

Aleksandr Evgenyevich Zverovshchikov[1]✉, Yulia Nikolaevna Kosheleva[2], Dmitry Vladimirovich Artamonov[3], Pavel Aleksandrovich Gurin[4], Anastasia Alekseevna Petryakova[5]
[1-5] Penza State University, Penza, Russia
[1] azwer@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-7827-7462
[2] j231@mail.ru
[3] rector@pnzgu.ru; https://orcid.org/0000-0002-3240-7222
[4] sbgurin_pavel@list.ru
[5] petryak0va_n255@mail.ru

Abstract

Deep grinding with profiled diamond wheels is a high-performance machining method. This method is used for machining a wide range of carbide products. However, since the entire allowance is removed in one machining pass during deep grinding, the process is characterized by increased heat generation. High temperatures in the machining area have a negative effect on the quality of products. It is possible to limit the negative impact of the heat intensity of the machining process by selecting rational grinding modes. The paper objective is to ensure the quality of machining during deep grinding of a carbide cutting tool with profiled diamond wheels based on a systems approach. Deep grinding was considered from the point of view of two limiting conditions - blunting of the diamond wheel and the heat stress of the process. The controlling factors are the feed rate of the part, the grinding depth and the choice of a coolant. Based on the strength characteristics of a carbide material, a crack formation criterion is introduced - the stress intensity coefficient. An algorithm for assigning rational grinding modes is developed based on an analysis of the conditions for maintaining the cutting ability of the wheel and the division of thermal fields and temperature stresses. The engineering preparation of the profiled grinding operation is carried out, the machining modes of the carbide end mill are assigned, finite element modeling of thermal processes in the machining area is performed, and the possible defect of the treated surface is analyzed. A method is proposed for identifying the areas of the profile that are most dangerous for defects based on the temperature gradient and temperature stresses in different sections of the profile. The proposed algorithm for determining the modes of profiled deep diamond grinding of hard alloys ensures the achievement of high-quality product parameters with high productivity of grinding.

Keywords: grinding, wheel blunting, speed, feed, part, coolant, tension, modeling.

Funding: The paper is funded by the Federal project "Science and Personnel for the Production Means and Automation" during the implementation of the research project "Study of Forming Tungsten Carbide Surface Layer on Metal Parts and the Development of a Method to Ensure the Maximum Life of Loaded Parts and Hardening of Cutting Tools for Producing Highly Loaded Structural Elements" (FSGE-2026-0026).

Reference for citing:
Zverovshchikov AV, Kosheleva YuN, Artamonov DV, Gurin PA, Petryakova AA. Systems approach to ensuring the quality of machining during deep grinding of carbide cutting tools with profiled diamond wheels. Transport Engineering. 2026;7: 41-50. doi: 10.30987/2782-5957-2026-7-41-50.

Введение

Профильное глубинное алмазное шлифование труднообрабатываемых материалов является высокопроизводительным методом обработки [1, 2]. Он успешно используется для заточки твердосплавного режущего инструмента сложного профиля, такого как фасонные резцы, осевой инструмент- концевые фрезы, сверла [1, 3]. Также методом профильного глубинного шлифования обрабатывают елочные замки хвостовиков турбинных лопаток, медицинский твердосплавной инструмент [4]. В некоторых случаях профильное глубинное алмазное шлифование является единственным технологически возможным методом обработки, например, для вышлифовки

фасонных канавок на зубьях концевой фрезы для черновой обработки.

Процесс глубинного шлифования позволяет обеспечить высокую производительность при обработке профильных поверхностей труднообрабатываемых материалов, что в свою очередь приводит к возникновению повышенных температур в зоне обработки [2]. Температуры могут достигать 1000 °С, что может привести к возникновению таких дефектов как прижоги и микротрещины в поверхностных слоях обрабатываемого изделия [2, 3].

Температура в зоне обработки в свою очередь зависит от режимов шлифования. Снизить теплонапряженность процесса обработки можно путем подбора рациональных режимов шлифования и выбора СОЖ [5].

Материалы, модели, эксперименты и методы

К выбору режимов шлифования следует подходить системно, с одной стороны обеспечивая заданное качество шлифованных поверхностей, с другой - обеспечивая наибольшую производительность процесса обработки [6]. Исходя из этого принципа, сформируем концептуальную логическую модель процесса глубинного шлифования и попытаемся формализовать ее в виде алгоритма. Рассмотрим технологию глубинного шлифования профильными алмазными кругами как систему, в которой в качестве управляющих факторов примем скорость подачи детали (подачу) $V_и$, глубину шлифования t и выбор смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС), характеристики алмазного круга. Целевой функцией будем считать производительность процесса. Граничными условиями, примем с одной стороны критический параметр качества при шлифовании - отсутствие дефектов поверхности, который определяется теплонапряженностью процесса обработки, и, с другой стороны условие незасаливания круга. Последнее, в свою очередь, определим параметром равенства объемов межзернового пространства $V_{МЗП}$, в котором размещаются продукты диспергирования, и объема стружки $V_{СТР}$ [7]. Отсутствие дефектов на поверхности определим из невыполнения условий трещинообразования, формирующихся под воздействием тепловых и силовых напряжений в процессе шлифования.

На первом этапе алгоритма управления режимами шлифования (рис. 1) необходимо проанализировать техническое задание, геометрию изделия и оценить необходимость применения профильного глубинного алмазного шлифования. Выбор схемы шлифования зависит от конфигурации изделия, получения необходимой точности и качества поверхности заданного профиля.

Исходными данными (блок 2, рис.1) для решения задачи по определению режимов шлифования являются: материал шлифуемой детали, профиль изделия, получаемая шероховатость поверхности.

Далее необходимо выбрать характеристики алмазного круга (блок 3, рис.1): диаметр шлифовального круга, его геометрию, марку алмазного порошка, зернистость шлифовального порошка, концентрацию алмазов в алмазоносном слое, тип связки круга. Марка, тип связки и концентрация выбираются исходя из условий обработки и правки круга [8]. Выбор зернистости зависит от шероховатости поверхности детали, например, для обеспечения шероховатости по параметру Ra 0,2 подойдет алмазный порошок зернистостью 100/80 или 80/63[9].

На следующем этапе назначаются режимы шлифования (блок 4, рис.1). Глубина шлифования t будет определяться геометрией обрабатываемой поверхности, при глубинном шлифовании она может достигать 3…5 мм. Скорость шлифовального круга $V_{кр}$ и подачу детали $V_и$ первоначально выбираем близкими к максимальным, в пределах рекомендуемых скоростей 20…35 м/с [6,7], и диапазона подач 0,01…0,05 м/мин.

В блоке 5 (рис.1) проверяется условие засаливания круга. Данный ограничивающий фактор, является условием обеспечения стабильных режущих свойств шлифовального круга. Алмазные круги на металлических связках обладают низкой

пористостью (около 2 %), в связи с этим возникает проблема с размещением стружки. Весь объем снятой стружки до момента удаления центробежными силами или правкой должен размещаться в межзерновом пространстве алмазного круга, в противном случае шлифовальный круг быстро потеряет свои режущие свойства.

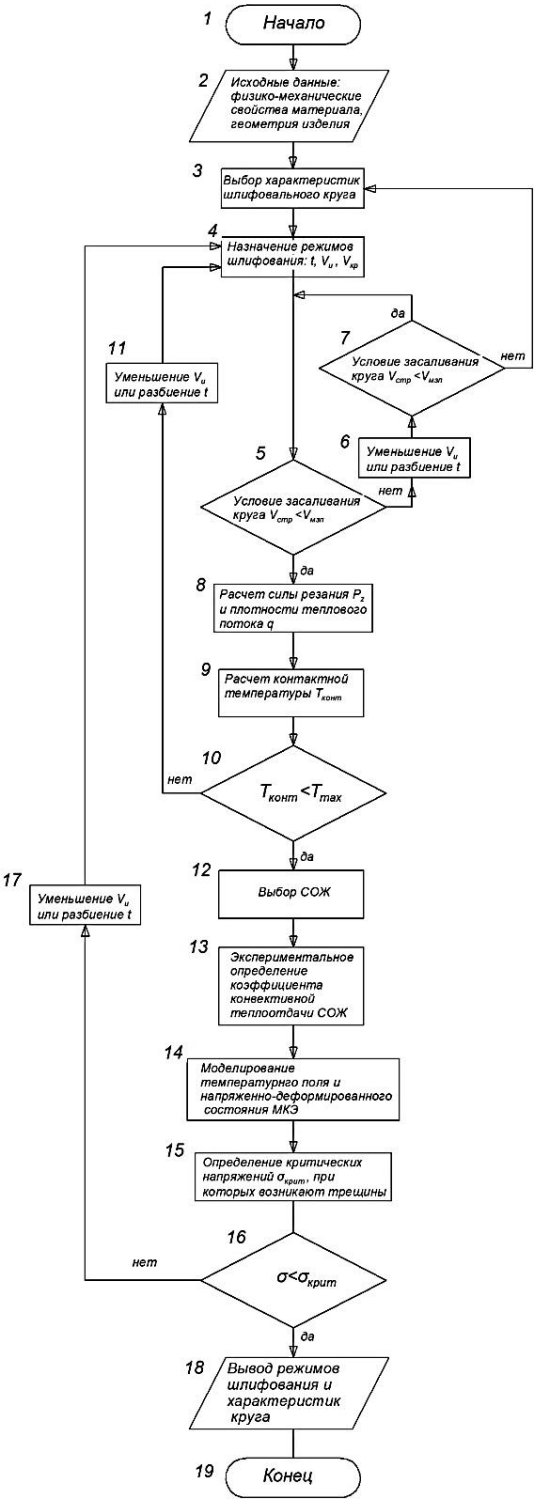


Рис. 1. Алгоритм выбора режимов шлифования
Fig. 1. Algorithm for selecting grinding modes

Режимы шлифования могут быть определены из условия равенства объемов межзернового пространства $V_{МЗП}$, в котором размещаются продукты диспергирования, и объема стружки $V_{СТР}$ [7]:

$$V_{СТР} = V_{МЗП}. \quad (1)$$

Из этого условия можно определить предельную скорость подачи детали $V_и$:

$$V_и = \frac{V_{мзп1} n V_{кр}}{545{,}5\pi D_к t B_к}, \quad (2)$$

где t – глубина шлифования, мм; $V_{кр}$ – скорость шлифовального круга, м/с; n – количество зерен на поверхности круга; $B_к$ – ширина алмазного круга, мм; $D_к$.– диаметр алмазного круга, мм; $V_{мзп1}$ – объем межзернового пространства, приходящийся на одно режущее зерно.

Если условие засаливания круга не выполняется, необходимо либо уменьшить $V_и$, либо разбить t на несколько проходов шлифовального круга (блок 6, см. рис.1). Если условие засаливания не выполняется и в этом случае (блок 7, см. рис.1) необходимо выбрать шлифовальный круг с другими характеристиками.

После того, как режимы шлифования назначены и $V_и$ рассчитана из условия сохранения режущей способности круга, рассчитывается максимальная контактная температура (блок 9, рис. 1) [10]:

$$T = \frac{P_z V_{кр} \psi_Д}{B_к \sqrt{\lambda \rho c} \sqrt[4]{D_к t} \sqrt{V_И}}, \quad (3)$$

где P_z- тангенциальная составляющая силы резания, возникающая при шлифовании, *Н*; $\psi_д$ - коэффициент, учитывающий количество тепла, переходящего в деталь; λ – коэффициент теплопроводности, *Вт/(мК)*; c – удельная теплоемкость шлифуемого материала, *Дж/(кгК)*; ρ – плотность материала, *кг/м*^{3}.

В (3) $B_к$ длина кривой сложного профиля шлифовального круга. Для случая плоского шлифования $B_к$ будет равна ширине круга. При профильном шлифовании $B_к$ определится как $B_{проф}$, которая будет представлять собой следующий интеграл, при условии, что кривая профиля соответствует функции *f(x)* в пределах от *a* до *b* (рис. 2):

$$B_{проф} = \int_a^b \sqrt{1 + (f'(x))^2}\, dx \quad (4)$$

Однако, в зависимости от функции *f(x)* вычисления могут быть достаточно трудоемкими. В связи с этим предложено разбить шлифовальный круг на дискретные участки единичной ширины B_i и считать, что эти круги единичной ширины имеют плоский профиль.

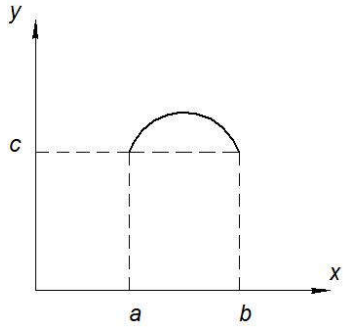


Рис. 2. Профиль шлифовального круга как непрерывная функция *f(x)*
Fig. 2. The profile of a grinding wheel as a continuous function f(x)

Тогда $B_{\text{проф}}$ можно рассчитать как:

$$B_{\text{проф}} = \sum_{i=1}^{n} B_i , \qquad (5)$$

Максимальная контактная температура $T_{\text{конт}}$ не должна превышать предельных значений. Для твердых сплавов в качестве такого значения принята точка фазового перехода кобальта, 700^0С, при которой он меняет кристаллическую структуру [11]. Если условие не выполняется (блок 10, рис.1), корректируем режимы шлифования. Если условие выполняется, переходим к моделированию температур и напряжений методом конечных элементов (блок 14, рис.1).

Перед конечно-элементным моделированием необходимо рассчитать плотность теплового потока *q* (блок 9, рис.1), силу резания *Pz*, (блок 8, рис.1), а также назначить СОЖ (блок 12, рис.1). Для того чтобы учесть действие СОЖ при моделировании экспериментальным путем определяется коэффициент конвективной теплоотдачи (блок 13, рис.1) [12].

Конечно-элементное моделирование позволяет получить картину распределения температур по профилю изделия, учесть влияние СОЖ на температурное поле, а также получить картину распределения температурных напряжений. По полученным данным можно судить о возможности появления дефектов на поверхности изделия.

Для оценки возможности появления трещин введен критерий трещинообразования и с помощью него рассчитано критическое напряжение $\sigma_{\text{крит}}$, при котором будут возникать трещины (блок 16, рис.1). Если условие блока 16 (рис.1) не выполняется, корректируются режимы обработки, если условие выполняется, принятые режимы шлифования подходят для обработки данного изделия.

В качестве критерия трещинообразования принят максимальный коэффициент интенсивности напряжений $K_{\text{ин}}$ или вязкость разрушения, являющийся характеристикой трещиностойкости материала. Наиболее правомерной можно считать гипотезу, что трещины будут появляться в случае, если суммарные напряжения в материале превысят значение некоторого критического напряжения σ_k.

Максимальный коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} может быть определен по формуле Ю. Мураками [13]:

$$K_{Ic} = \sigma_{\text{к}}\sqrt{\pi l_{\text{к}}}, \qquad (6)$$

где $\sigma_{\text{к}}$ – напряжение в области трещины, *l* – длина трещины.

Трещина, достигнув критической длины l_k при напряжении σ_k, становится неустойчивой, а коэффициент интенсивности напряжений достигает своего предельного значения K_{Ic} , которое является силовым критерием разрушения. Таким образом, зная K_{Ic} и l_k можно определить напряжение σ_k, которое приведет к образованию трещин.

Известно, что для твердых сплавов группы ВК с основной фракцией карбидных частиц 1,7 мкм значения K_{Ic} составляет 17 МПа·м$^{1/2}$ [14].

В качестве длины трещины, достаточной для критического ее распространения при эксплуатации примем гипотезу, что значение не должно превышать 50 *мкм* – допустимого размер пор в твердосплавных пластинках [15].

Таким образом, в качестве критического можно принять напряжение, рассчитанное по преобразованной формуле 6:

$$\sigma_{\text{к}} = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi \cdot l_{\text{к}}}} \qquad (7)$$

Напряжение, приводящее к появлению трещин, для вышеописанных условий составит σ_k=1356,74 МПа, что близко сопоставимо со справочными данными предела прочности на изгиб твердых сплавов [15] (у Т15К6 1176 МПа, у ВК8 1666 МПа). Поэтому для моделирования этих и других марок твердых сплавов правомерно с достаточной достоверностью принять гипотезу, что формирование трещины от термических или иных напряжений на рассматриваемом участке изделия из твердого сплава будет происходить при превышении 80 % предела прочности на изгиб. Критическое напряжение трещинообразования можно рассчитать:

$$\sigma_к \approx 0{,}8\sigma_в \qquad (8)$$

Применение системного подхода к процессу профильного глубинного алмазного шлифования позволяет добиться повышения производительности обработки при обеспечении функционального качества поверхностного слоя твердосплавного изделия.

В качестве примера использования методики назначения режимов обработки при профильном глубинном алмазном шлифовании разработана технология шлифования фасонных канавок на поверхности концевой фрезы для черновой обработки (рисунок 3).

Для шлифования стружкоотводящих канавок на спиральных поверхностях использован алмазный круг со сложным профилем (рис. 4).



Рис. 3. Концевая фреза из твердого сплава для черновой обработки
Fig. 3. Carbide end mill for rough machining

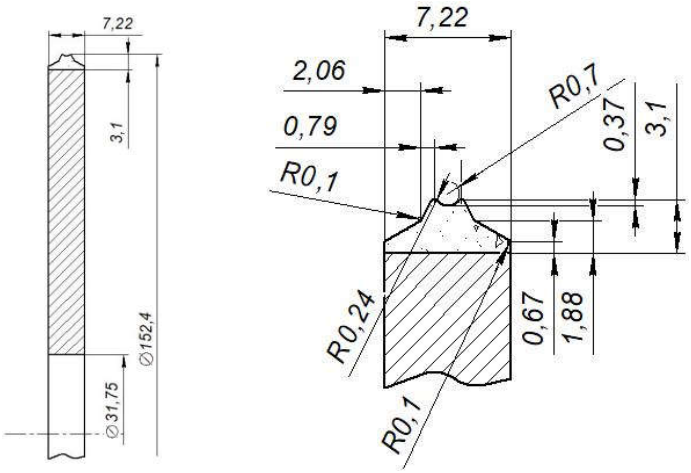
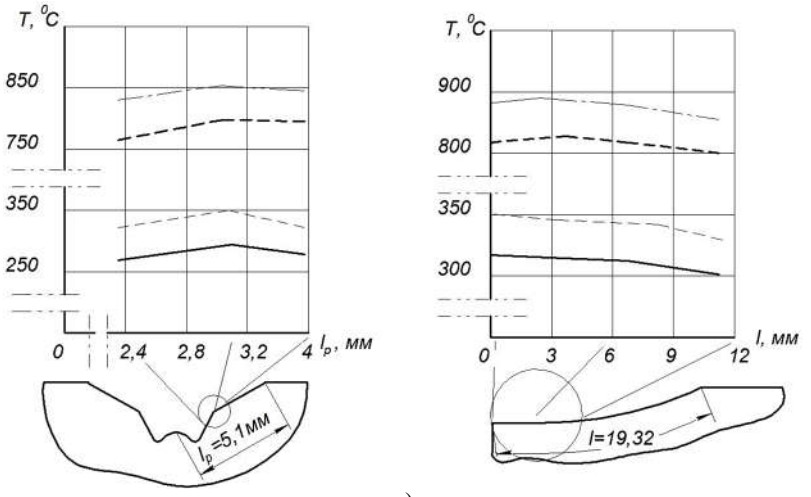


Рис. 4. Профиль алмазного круга для обработки канавок концевой фрезы (ширина круга *B=7,22 мм,* глубина шлифования *t*=2,45 *мм*)
Fig. 4. *Profile of a diamond wheel for processing the grooves of an end mill (wheel width B=7.22 mm, grinding depth t=2.45 mm)*

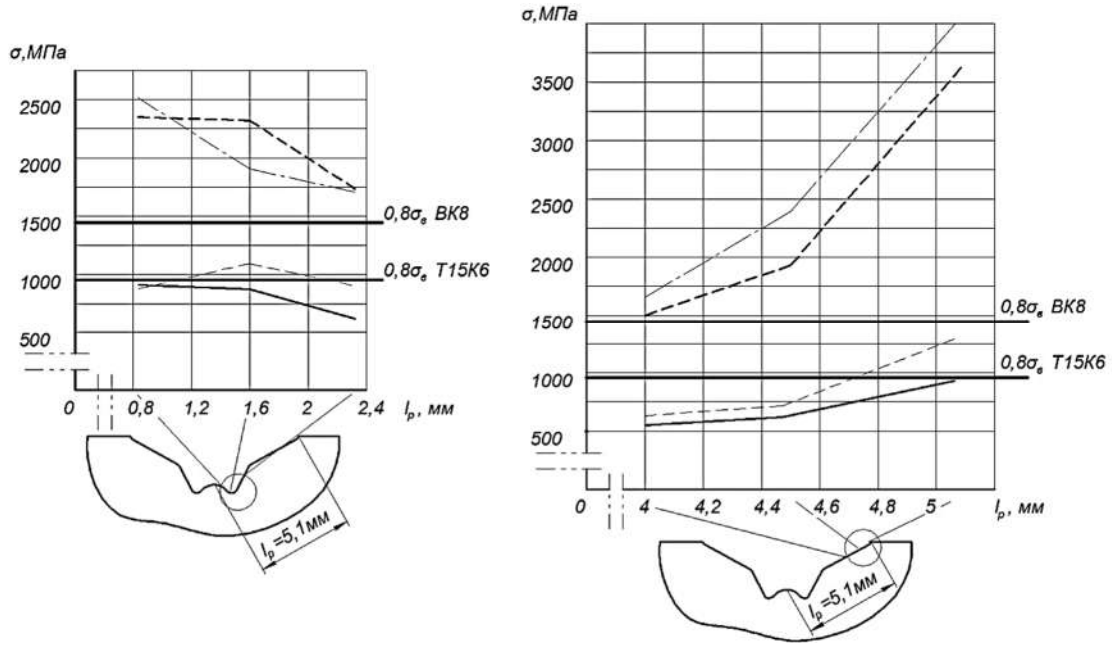
Результаты

Из условия невыполнения засаливания круга (блок 5, рис.1) получены режимы шлифования: $V_{кр}$ = 35 м/с, $V_и$ = 0,025 м/мин, t = 2,45 мм для обработки на пятикоординатном заточном станке НТМ-120L профильным алмазным кругом, марка алмазов АС6, зернистость алмазного порошка 100/80. Далее по алгоритму (рис. 1) проведено конечно-элементное моделирование.

Результаты моделирования представлены на рис. 5.



а)



б)

Рис. 5. Распределение в опасных зонах профиля: а –температур, $T\,^0$C; и б- напряжений, *МПа;*
(— — — для твердого сплава Т15К6 без СОЖ, ——— для твердого сплава Т15К6 с СОЖ,
——— – —для твердого сплава ВК8 без СОЖ, — — — - для твердого сплава ВК8 с СОЖ)

Fig. 5. Distribution of a-temperatures, $T\,^0$C, and b-stresses, MPa, in the dangerous areas of the profile
(— — — for T15K6 hard alloy without cutting fluid, ——— for T15K6 hard alloy with cutting fluid,
——— – — for VK8 hard alloy without cutting fluid, — — — - for VK8 hard alloy with cutting fluid)

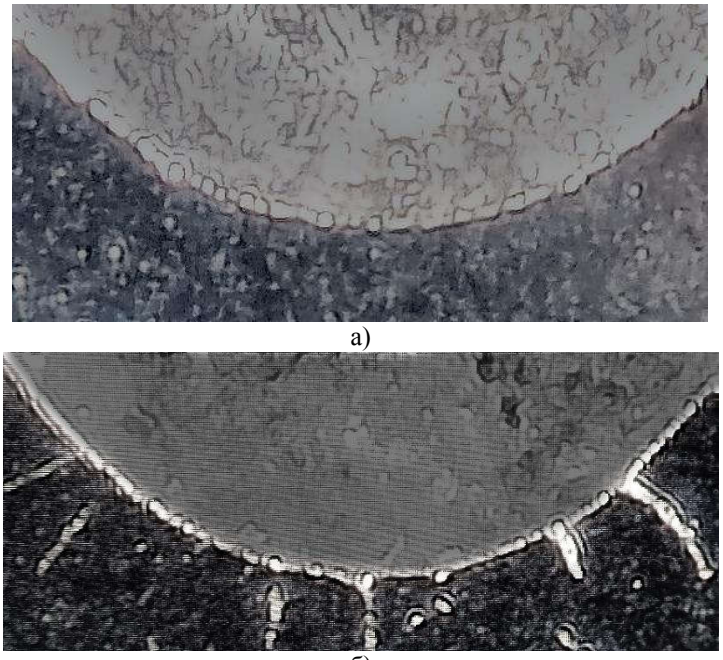
В результате анализа результатов моделирования выявлено, что опасными зонами являются точки перегиба профиля (рис. 5а, б). В точке наибольшего углубления профиля возникают наибольшие температурные напряжения, в точке у края профиля имеет место максимальный градиент температур. При моделировании и выходном контроле готовой фрезы на эти зоны нужно обратить внимание, поскольку здесь вероятность появления дефектов, таких как прижоги и микротрещины, будет максимальной.

По результатам моделирования при шлифовании с СОЖ данного образца кругом сложного профиля (рис. 2) установлено, что в пределах профиля и дуги контакта круга на предложенных режимах с применением СОЖ не возникает напряжений, приводящих к возникновению трещин.

На предлагаемых предельных режимах обработана черновая фреза (рис. 3) алмазным кругом (рис. 4). Полученные микрошлифы (рисунок 6) обработанной поверхности исследованы на электронном микроскопе *Insein Li Fung 500X* , макси-

мальное увеличение 100 крат, на наличие микротрещин и прижогов. Исследовались два образца, первый обработан на рекомендуемых режимах шлифования, второй - при превышении скорости подачи детали $V_и$ = 0,03 *м/мин*.

На первом образце (рис. 6а) трещин и прижогов не обнаружено, на втором образце (рис. 6б) выявлены микротрещины. Таким образом, экспериментальные исследования подтверждают результаты моделирования.



а)

б)

Рис. 6. Микрошлифы образцов, обработанных: а-на рекомендуемых режимах шлифования $V_{кр}$=35 м/с, $V_и$=0,025 м/мин, t=2,45 мм;
б-с превышением рекомендуемых режимов $V_{кр}$=35 м/с, $V_и$=0,03 м/мин, t=2,45 мм.
Fig. 6. Micrographs of samples processed: a-at the recommended grinding modes V_{kr}=35 m/s, V_u=0.025 m/min, t=2.45 mm, b-with exceeding the recommended modes V_{kr}=35 m/s, V_u=0.03 m/min, t=2.45 mm

Заключение

1. На основе концептуальной модели процесса предложен алгоритм определения режимов профильного глубинного алмазного шлифования твердых сплавов, обеспечивающий достижение качественных параметров изделия и одновременно высокой производительности процесса шлифования.

2. Предложена методика оценки качественных характеристик поверхности шлифуемого изделия, а именно отсутствия дефектов в виде прижогов и микротрещин, на основании расчетов и конечно-элементного моделирования

3. Предложен критерий σ_k, который позволяет формализовать оценку возможности появления микротрещин при шлифовании твердого сплава

4. Предложена методика определения максимальной производительности процесса из условия засаливания алмазного круга.

5. Апробирована и экспериментально проверена методика назначения рациональных режимов глубинного шлифования профильными алмазными кругами изделий из труднообрабатываемых материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абдулгазис Д.У., Абдулгазис У.А., Братан С.М. Оценка целесообразности применения алмазных шлифовальных кругов для обработки твердых сплавов в режиме глубинного шлифования// Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2022. N3 (77) с. 123-128. DOI: 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.024

2. Безъязычный В.Ф., Голованов Д.С. Качество поверхностного слоя деталей из титановых сплавов при глубинном шлифовании// Вестник РГТА имени П.А. Соловьева. 2017. N3(42) с. 65-69. EDN: WPTHMM
3. Цветков Б.В., Волков Д.И., Коряжкин А.А. Моделирование тепловых процессов при высокоскоростном глубинном шлифовании инструментом из кубического нитрида бора// Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2023. № 4 (67). С. 38-45. EDN: OIRQJS
4. Коряжкин А.А., Носенко С.В., Носенко В.А. Повышение эффективности обработки рабочих лопаток компрессора из титанового сплава методом многокоординатного глубинного шлифования/ Известия Волгоградского государственного технического университета, Учредители: Волгоградский государственный технический университет, 2019 N1(224) , с. 17-21. EDN: YWNDHV
5. Носенко В.А., Сердюков Н.Д., Шкода О.М., Самарский П.И. Испытание СОЖ на операции плоского врезного шлифования титанового сплава// Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. № 8 (243). С. 40-43. DOI: 10.35211/1990-5297-2020-8-243-40-43
6. Макаров В.Ф., Никитин С.П. Кинематика формообразования элементарных участков поверхности при глубинном профильном шлифовании турбинной лопатки/ Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2017. № 1 (40). С. 173-181. EDN: YOYBYH
7. Воячек И.И., Кошелева Ю.Н., Муйземнек А.Ю. Выбор режимов алмазного глубинного шлифования труднообрабатываемых материалов из условия сохранения режущей способности круга.- Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки.- Пенза: Пензенский государственный университет, № 1, 2013, с. 94-101. EDN: QANNKR
8. Бровкина Я.Ю., Шабалин Д.Н., Козарь И.И., Петров А.В. Методика исследования параметров алмазного шлифовального круга и повышения периода стойкости кругов за счет снижения сил трения при обработке технической керамики// Перспективные машиностроительные технологии. сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 20-23. EDN: DKPRZS
9. Широков А.В., Осипов А.П. Повышение эффективности шлифования заготовок на основе имитационного моделирования процесса формирования шероховатости поверхности: монография/ А.В. Широков, А.П. Осипов.-Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016.-142 с. EDN: YUGRKH
10. Соколов В.О., Кошелева Ю.Н. Особенности тепловых процессов при глубинном алмазном шлифовании // Технологическое обеспечение качества машин и приборов: сборник статей IV Международной научно-практической конференции.- Пенза: Приволжский дом знаний, 2008., с. 35-37.
11. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник. Металлургия, 1989.
12. Зверовщиков А.Е., Кошелева Ю.Н. Исследование влияния смазочно-охлаждающей жидкости на процесс глубинного алмазного шлифования твердосплавных изделий // Актуальные проблемы станкостроения-2025: сборник статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Пенза, 23-25 октября 2025 г.)/ под общ. ред. д.т.н., проф. А.Е. Зверовщикова, к.т.н., доцента С.А. Нестерова, к.т.н., доцента Д.В. Кочеткова, к.т.н., доцента Г.С. Большакова.- Пенза: Изд-во ПГУ, 2025.-372 с., с. 194-198.
13. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений : В 2 т. / [Ито Ю. и др.] ; Под ред. Ю. Мураками; Пер. с англ. под ред. Р. В. Гольдштейна, Н. А. Махутова. - М. : Мир, 1990.
14. Рева В.П., Онищенко Д.В., Петров В.В., Ким В.А., Евстигнеев А.И. Формирование твердого сплава ВК8 с использованием порошка карбида вольфрама, синтезированного по механохимической технологии.- Новые огнеупоры. 2013. № 7. С. 39-43. EDN: RTABTN
15. Жадяев А.А. Физико-механические свойства твердосплавного вооружения буровых шарошечных долот с типичными для сплава WC-CO неоднородностями структуры.- Наукоемкие технологии в машиностроении. 2022. № 6 (132). С. 3-11. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-6-3-11.

REFERENCES

1. Abdulgazis DU, Abdulgazis UA, Bratan SM. Assessment of the feasibility of using diamond grinding wheels for machining hard alloys in deep grinding mode. Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University. 2022;3(77):123-128. DOI: 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.024
2. Bezyazychny VF, Golovanov DS. Quality of the surface layer of titanium alloy parts in deep grinding. Bulletin of RSATU named after P.A. Solovyov. 2017;3(42): 65-69.
3. Tsvetkov BV, Volkov DI, Koryazhkin AA. Modeling of thermal processes during high-speed deep grinding with a cubic boron nitride tool. Bulletin of RSATU named after P.A. Solovyov. 2023;4(67):38-45.
4. Koryazhkin AA, Nosenko SV, Nosenko VA. Improving the efficiency of machining compressor blades made of titanium alloy by multi-axis deep grinding. / Izvestiya of Volgograd State Technical University. 2019;1(224):17-21.
5. Nosenko VA, Serdyukov ND, Shkoda OM, Samarsky PI. Coolant testing for the operation of flat mortise grinding of titanium alloy. Izvestiya of Volgograd State Technical University. 2020;8(243):40-43. DOI: 10.35211/1990-5297-2020-8-243-40-43
6. Makarov VF, Nikitin SP. Kinematics of shaping elementary surface sections during deep profile grinding of a turbine blade. Bulletin of RSATU named after P.A. Solovyov. 2017;1(40):173-181.
7. Voyachek II, Kosheleva YuN, Muizemnek AYu. Selecting the modes of deep diamond grinding

modes of churlish materials for retaining circle's cutting capacity. University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences. 2013;1:94-101.
8. Brovkina YaYu, Shabalin DN, Kozar II, Petrov AV. Method for studying the parameters of a diamond grinding wheel and increasing the durability period of circles by reducing friction forces when machining technical ceramics. Collection of Scientific Papers of the International Scientific and Practical Conference, 2023: Promising Engineering Technologies. Saint Petersburg; 2023. p. 20-23.
9. Shirokov AV, Osipov AP. Improving the efficiency of grinding workpieces based on simulation modeling of the surface roughness formation process: monograph. Samara: Samara State Technical University; 2016.
10. Sokolov VO, Kosheleva YuN. Features of thermal processes during deep diamond grinding. Collection of Papers of the IV International Scientific and Practical Conference Technological, 2008: Quality Assurance of Machines and Devices. Penza: Privolzhsky House of Knowledge; 2008. p. 35-37.
11. Zinoviev VE. Thermophysical properties of metals at high temperatures: handbook. Metallurgy; 1989.
12. Zverovshchikov AE, Kosheleva YuN. Study of the effect of lubricating and cooling liquid on deep diamond grinding of carbide products. Collection of Papers of the II All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, October 23-25, 2025: Actual Problems of Machine Tool Engineering-2025. Penza: Publishing House of PSU; 2025.
13. Ito Yu. Handbook of stress intensity coefficients. Moscow: Mir; 1990.
14. Reva VP, Onishchenko DV, Petrov VV, Kim VA, Evstigneev AI. Formation of a hard alloy VK8 using tungsten carbide powder synthesized using mechanochemical technology. Novye Ogneupory (New Refractories). 2013;7:39-43.
15. Zhadyaev AA. Physical and mechanical properties of WC-CO cemented carbides of roller cone bits with inhomogeneous structures. Science-intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2022;6(132):3-11. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-6-3-11

Информация об авторах:

Зверовщиков Александр Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, должность Заведующий кафедрой, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 56891713100, Research- ID-Web of Science Y 3779-2018, Author-ID-РИНЦ 326167, тел. +79374002393.
Кошелева Юлия Николаевна – специалист по УМР 1-й категории, тел. +79273891159.

Артамонов Дмитрий Владимирович – доктор технических наук, профессор, и.о. ректора, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 57195502395, Author-ID-РИНЦ 262426, тел. +7(8412) 66-60-01.
Гурин Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент, тел. +79050155274.
Петрякова Анастасия Алексеевна – студент, тел. +79273820872.

Zverovshchikov Aleksandr Evgenievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department; Scopus-Author ID 56891713100, Research-ID-Web of Science Y 3779-2018, Author-ID-RSCI 326167; phone: +79374002393.
Kosheleva Yulia Nikolaevna – Specialist in Education and Methods, phone: +79273891159.

Artamonov Dmitry Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Acting Rector; Scopus-Author ID 57195502395, Author-ID-RSCI 262426; phone: +7 (8412) 66-60-01.
Gurin Pavel Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; phone:+79050155274.
Petryakova Anastasia Alekseevna – Student, phone: +79273820872.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 28.04.2026; одобрена после рецензирования 03.06.2026; принята к публикации 26.06.2026. Рецензент – Хандожко А.В., доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, главный редактор журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 28.04.2026; approved after review on 03.06.2026; accepted for publication on 26.06.2026. The reviewer is Khandozhko A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.

12+

Научное издание

ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Редактирование Н.Ю. Лакалина
Компьютерная верстка В.А. Ерохина

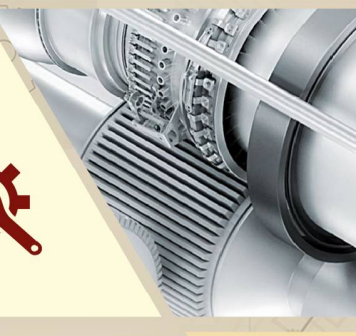
Подписано в печать 15.07.26. Дата выхода в свет 30.07.26. Формат 60×84 1/8 .
Бумага офсетная. Офсетная печать. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,0.
Тираж 500 экз. Свободная цена.

Учредитель и издатель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Брянский государственный технический университет»
(БГТУ)

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».
241035, Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7, БГТУ, тел. (4832) 58-82-77.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии БГТУ,
241035, Брянск, ул. Институтская, 16






086
ЭПІ




ZMM-BULGARIA