УДК 621.923
doi: 10.21685/2072-3059-2026-1-15

Предотвращение трещинообразования при алмазном глубинном шлифовании твердосплавных фрез на основе моделирования тепловых процессов

А. Е. Зверовщиков[1], Ю. Н. Кошелева[2], В. З. Зверовщиков[3], Г. С. Большаков[4], Д. А. Шелахаев[5]

[1,2,3,4]Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
[5]Научно-производственное предприятие «Новотех», Пенза, Россия
[1]azwer@mail.ru, [2]j231@mail.ru, [3]wzzwer@mail.ru,
[4]geraman83@mail.ru, [5]shelahaev@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Метод глубинного шлифования профильными алмазными кругами широко используется при изготовлении различных твердосплавных режущих инструментов со сложным профилем рабочей поверхности – фасонных резцов, концевых фрез, сверл, а также для формирования елочного профиля на хвостовиках лопаток турбин. Применение этого метода позволяет значительно повысить производительность процесса по сравнению с традиционной схемой многопроходной обработки. В то же время при глубинном шлифовании в зоне резания возникают высокие температуры, что негативно сказывается на качестве обработанных поверхностей изделий. Снизить теплонапряженность процесса можно путем определения рациональных режимов шлифования. Целью исследования является разработка методики оценки допустимости технологических режимов на основе информации о величине температурных напряжений, сопровождающих процесс глубинного профильного шлифования. *Материалы и методы.* Исследование теплонапряженности процесса шлифования проводилось с использованием универсального метода конечных элементов. Анализ качества поверхностей образцов после шлифования производился на микроскопе Insein Li Fung 500X. *Результаты.* Рекомендации по назначению режимов глубинного шлифования канавок концевой фрезы разработаны на основе ограничения по теплонапряженности процесса. В качестве входных факторов были приняты: скорость подачи детали, глубина шлифования и характеристики смазочно-охлаждающей жидкости. Выполнено конечно-элементное моделирование процесса алмазного шлифования кругом сложного профиля. Исследованы температурные напряжения, возникающие при обработке, на основе которых можно прогнозировать появление дефектов на поверхностях шлифуемого изделия, а следовательно, обеспечить формирование бездефектного поверхностного слоя при глубинном шлифовании. *Выводы.* Разработаны рекомендации по повышению производительности процесса глубинного шлифования профильным алмазным кругом твердосплавных концевых фрез при отсутствии тепловых трещин на поверхностях изделий.

Ключевые слова: глубинное шлифование, профильный алмазный круг, засаливание круга, скорость подачи детали, смазочно-охлаждающая жидкость, температурные напряжения, конечно-элементное моделирование

Для цитирования: Зверовщиков А. Е., Кошелева Ю. Н., Зверовщиков В. З., Большаков Г. С., Шелахаев Д. А. Предотвращение трещинообразования при алмазном глубинном шлифовании твердосплавных фрез на основе моделирования тепловых процессов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2026. № 1. С. 165–178. doi: 10.21685/2072-3059-2026-1-15

© Зверовщиков А. Е., Кошелева Ю. Н., Зверовщиков В. З., Большаков Г. С., Шелахаев Д. А., 2026. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Prevention of crack formation during diamond deep grinding of hard alloy cutters based on thermal process modeling

A.E. Zverovshchikov[1], Yu.N. Kosheleva[2], V.Z. Zverovshchikov[3], G.S. Bolshakov[4], D.A. Shelakhaev[5]

[1,2,3,4]Penza State University, Penza, Russia
[5]Research and Production Enterprise "Novotech", Penza, Russia
[1]azwer@mail.ru, [2]j231@mail.ru, [3]wzzwer@mail.ru,
[4]geraman83@mail.ru, [5]shelahaev@yandex.ru

Abstract. *Background.* The method of deep grinding with profile diamond wheels is widely used in the production of various hard-alloy cutting tools with complex working surface profiles, such as shaped cutters, end mills, drills, and for forming a Christmas tree profile on the shanks of turbine blades. This method significantly increases the productivity of the process compared to the traditional multi-pass machining approach. However, deep grinding generates high temperatures in the cutting zone, which can negatively affect the quality of the processed surfaces. It is possible to reduce the heat intensity of the process by determining the rational grinding modes. The purpose of this research is to develop a methodology for assessing the permissibility of technological modes based on information about the magnitude of the temperature stresses that accompany the process of deep profile grinding. *Materials and methods.* The study of the heat intensity of the grinding process was carried out using the universal finite element method. The quality of the sample surfaces after grinding was analyzed using an Insein Li Fung 500X microscope. *Results.* Recommendations for the selection of deep grinding modes for the grooves of the end mill cutter have been developed based on the heat intensity of the process. The following input factors were considered: the feed rate of the part, the depth of grinding, and the characteristics of the cutting fluid. Finite element modeling of the process of diamond grinding with a complex-profile wheel has been performed. The temperature stresses that occur during the processing have been investigated, which can be used to predict the appearance of defects on the surfaces of the grinding product and, consequently, to ensure the formation of a defect-free surface layer during deep grinding. *Conclusions.* Recommendations have been developed to increase the productivity of the deep grinding process using a profile diamond wheel on solid-alloy end mills in the absence of thermal cracks on the product surfaces.

Keywords: deep grinding, profile diamond wheel, wheel soiling, part feed rate, cutting fluid, temperature stresses, finite element modeling

For citation: Zverovshchikov A.E., Kosheleva Yu.N., Zverovshchikov V.Z., Bolshakov G.S., Shelakhaev D.A. Prevention of crack formation during diamond deep grinding of hard alloy cutters based on thermal process modeling. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2026;(1):165–178. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2026-1-15

Введение

Глубинное алмазное шлифование во многих случаях является единственным методом обработки изделий из твердых сплавов для достижения требуемой точности обработки [1]. Метод обеспечивает стабильное формирование заданных характеристик качества поверхностей фасонных резцов, твердосплавных элементов фрез, составных сверл, оснащенных твердосплавными пластинами, наконечников пинцетов, лопаток турбин [2]. Установлено, что метод отличается высокой точностью размеров [1–3] и достаточно высокой производительностью обработки.

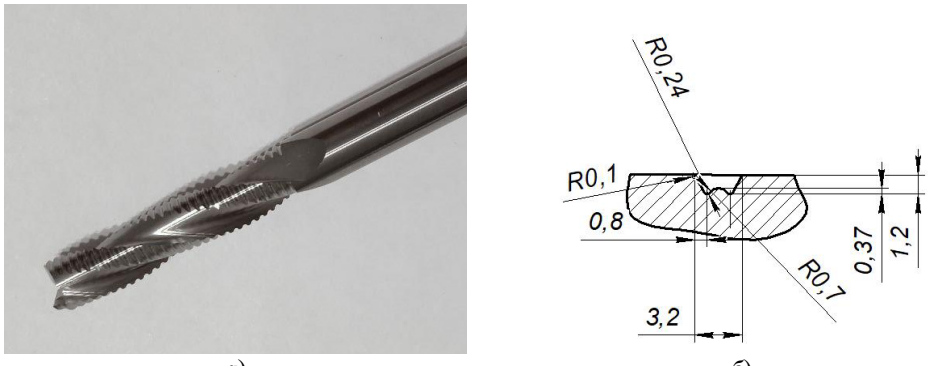
Несмотря на высокую производительность, широкое применение глубинного шлифования ограничено, так как при глубинном шлифовании в зоне резания возникают очень высокие температуры, которые могут достигать 1000 °С [3–6]. Тепловые процессы приводят к возникновению дефектов в виде микротрещин, что недопустимо при высоких требованиях к качеству сложнопрофильных поверхностей изделий [4, 7, 8]. Известные теоретические положения не позволяют научно обоснованно назначать рациональные режимы обработки для достижения заданных качественных характеристик поверхностного слоя обрабатываемого изделия при сохранении максимальной производительности процесса шлифования, что затрудняет выбор приемлемых технологических режимов. Это усложняет технологическую подготовку производства и увеличивает вероятный процент брака при внедрении технологии профильного шлифования. В производственных условиях целесообразно использовать моделирование тепловых процессов в зоне резания.

В литературе отсутствует информация о распределении тепловых полей по сложному обрабатываемому профилю в зоне резания при глубинном алмазном шлифовании твердого сплава [9]. Двухмерное моделирование сложного профиля не позволяет в полной мере оценить тепловые процессы во всех его точках, также предлагаемое описание профиля с помощью угла наклона общей нормали не позволяет применять предложенную методику для сложных профилей с большим количеством точек перегиба.

Целью исследования является разработка методики оценки допустимости технологических режимов на основе информации о величине температурных напряжений, сопровождающих процесс глубинного профильного шлифования.

Эффективным инструментом моделирования теплофизических процессов является метод конечных элементов. Для прогнозирования температур в зоне профильного шлифования использовалось программное обеспечение SolidWorks Simulation.

В качестве объекта моделирования был принят процесс глубинного алмазного шлифования профиля канавки твердосплавной концевой фрезы, применяемой при черновой обработке (рис. 1).



а) ***б***)

Рис. 1. Концевая фреза из твердого сплава со стружколомающими канавками,
а – фотография концевой фрезы; ***б*** – размеры и профиль канавки стружколома

Задача исследования – оценить распределение температур по обрабатываемому профилю в зоне резания. Значения температур в зоне резания при профильном шлифовании могут быть приняты за основу при назначении технологических режимов, предотвращающих появление на поверхности фрезы микротрещин.

Конфигурация шлифуемого профиля является основным фактором, определяющим температуру в зоне резания и, соответственно, режимы шлифования. Даже для изделий и операций, незначительно отличающихся размерами или формой профиля, могут иметь место существенные отличия в температурах при моделировании.

В качестве образцов использовались твердосплавные концевые фрезы из Т15К6 и ВК8 на стадии подготовки к серийному производству (см. рис. 1).

Материалы и методы

Для образования канавок на спиральных поверхностях фрезы при технологической подготовке производства планировалось использовать алмазный круг сложного профиля (рис. 2).

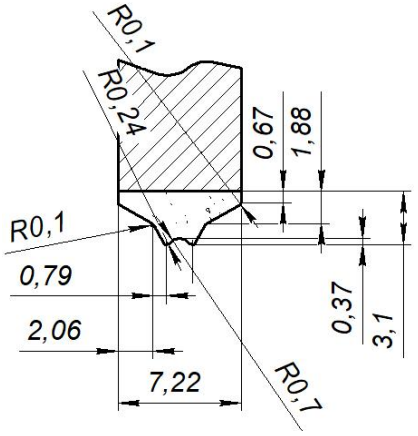


Рис. 2. Эскиз профиля алмазного круга для обработки канавок на концевой фрезе (ширина круга B = 7,22 мм, глубина шлифования t = 1,2 мм)

Моделирование проводилось для профильного глубинного шлифования периферией круга (рис. 2). Рассматривался сложный профиль, образованный на фрезе кругом (рис. 2), с наибольшей глубиной резания t = 1,2 мм. Моделирование, реализованное в SolidWorks Simulation, проводилось для обработки концевых фрез из твердых сплавов.

Конечно-элементная сетка представлена на рис. 3. Тип модели – линейный, упругий, изотропный; выбор разбиения сетки принимается на основе кривизны. Размер элемента максимальный – 2 мм, размер элемента минимальный – 0,1 мм, тип элемента – тетраэдр.

К исследуемой модели прикладывались нагрузки для следующих граничных условий: в начальный момент времени температура шлифуемого образца принималась равной температуре окружающей среды; по поверхности контакта шлифовального круга с изделием действует равномерно распределенный тепловой поток плотностью q; на остальных поверхностях происхо-

дит конвективный теплообмен с воздухом или со смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ).

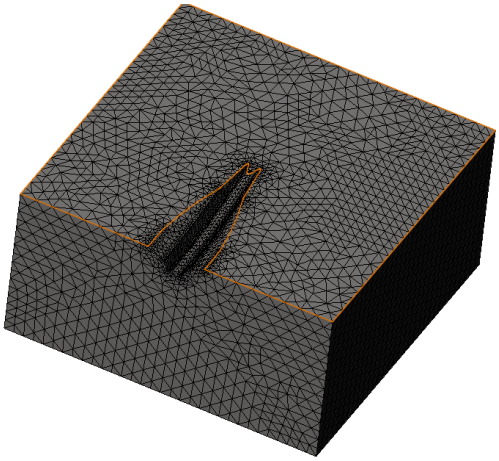


Рис. 3. Конечно-элементная сетка на модели

Плотность теплового потока может быть рассчитана по известной формуле [4]:

$$q = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{F},$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания, возникающая при шлифовании, Н; $V_{кр}$ – скорость шлифовального круга, м/с; F – площадь шлифования, м^2.

Тангенциальная составляющая силы резания определялась по методике, предложенной в работе [10] в зависимости от режимов шлифования.

Моделирование проводилось при шлифовании с применением СОЖ и без использования СОЖ. Принята гипотеза, что теплообмен с жидкостью происходит по закону Ньютона – Рихмана [4, 11], а коэффициент конвективной теплоотдачи α определялся экспериментальным путем [12]. В качестве СОЖ принимался 1 % раствор Синапола.

Тепловой поток рассчитывался в соответствии с рекомендациями [4] для интенсивных режимов шлифования, назначенных из условий достижения требуемой производительности на операции ($V_{кр}$ = 35 м/с, $V_{и}$ = 0,025 м/мин, t = 1,2 мм) и вызывавших опасения появления дефектов поверхностного слоя.

Результаты

Выполненное моделирование позволило получить распределение по профилю канавки температур и температурных напряжений с дискретностью сетки конечных элементов. Результаты моделирования представлены на рис. 4–6.

При моделировании были назначены и отслеживались контрольные точки в двух сечениях – 12 точек по дуге контакта круга с изделием и 10 точек по профилю образца в самом нагруженном сечении. В этих точках сни-

мались значения температур и напряжений с конечных элементов модели для построения графиков (рис. 7 и 8).

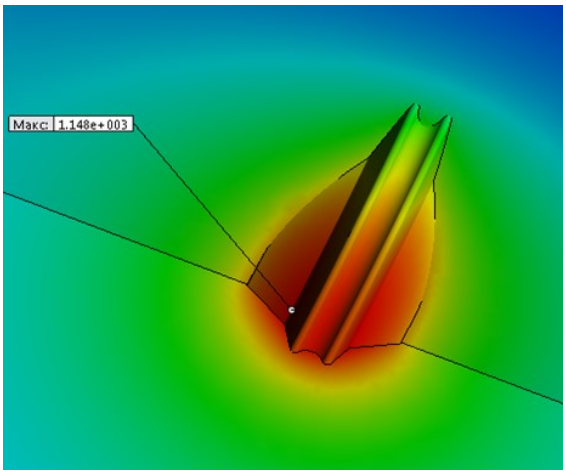


Рис. 4. Температурное поле зоны резания
(твердый сплав ВК8, шлифование без СОЖ)

На предложенных режимах ($V_{кр}$ = 35 м/с, $V_{и}$ = 0,025 м/мин, t = 1,2 мм), проверенных моделированием, обработана твердосплавная фреза диаметром 16 мм (см. рис. 1). Инструмент – спрофилированный алмазный круг (см. рис. 2) марка алмазов АС6, зернистость 80/63, концентрация 100 %, связка М1. Также обработан образец с превышением скорости подачи $V_{и}$ на 0,005 м/мин.

Для оценки качества обработанной поверхности были изготовлены микрошлифы (рис. 9) обоих образцов.

Микрошлифы были исследованы на микроскопе Insein Li Fung 500X на наличие микротрещин.

Обсуждения

Анализ температурных напряжений в зоне резания на основе выявленного распределения по профилю и дуге контакта позволяет судить об опасных зонах профиля, где возможно образование дефектов.

Основными признаками неблагополучных зон при анализе результатов моделирования считались наличие температур, превышающих температуру плавления кобальтовой связки твердого сплава, градиента температур, а также значения абсолютной величины напряжений от тепловых процессов.

В результате анализа установлено, что опасными при шлифовании кругом заданного профиля (см. рис. 2) являются точки *3*, *6* и *10* (рис. 7,***б*** и 8,***б***). В зоне, прилегающей к точке *6*, наблюдаются самые высокие температуры, в точке *3* возникают наибольшие температурные напряжения; в точке *10* отмечен максимальный градиент температур. Следовательно, именно на перечисленные выше зоны, прилегающие к точкам, следует обратить внимание при шлифовании кругом данного профиля при контроле готового изделия. Вероятность появления таких дефектов, как тепловые микротрещины, на этих участках профиля канавок будет максимальной.

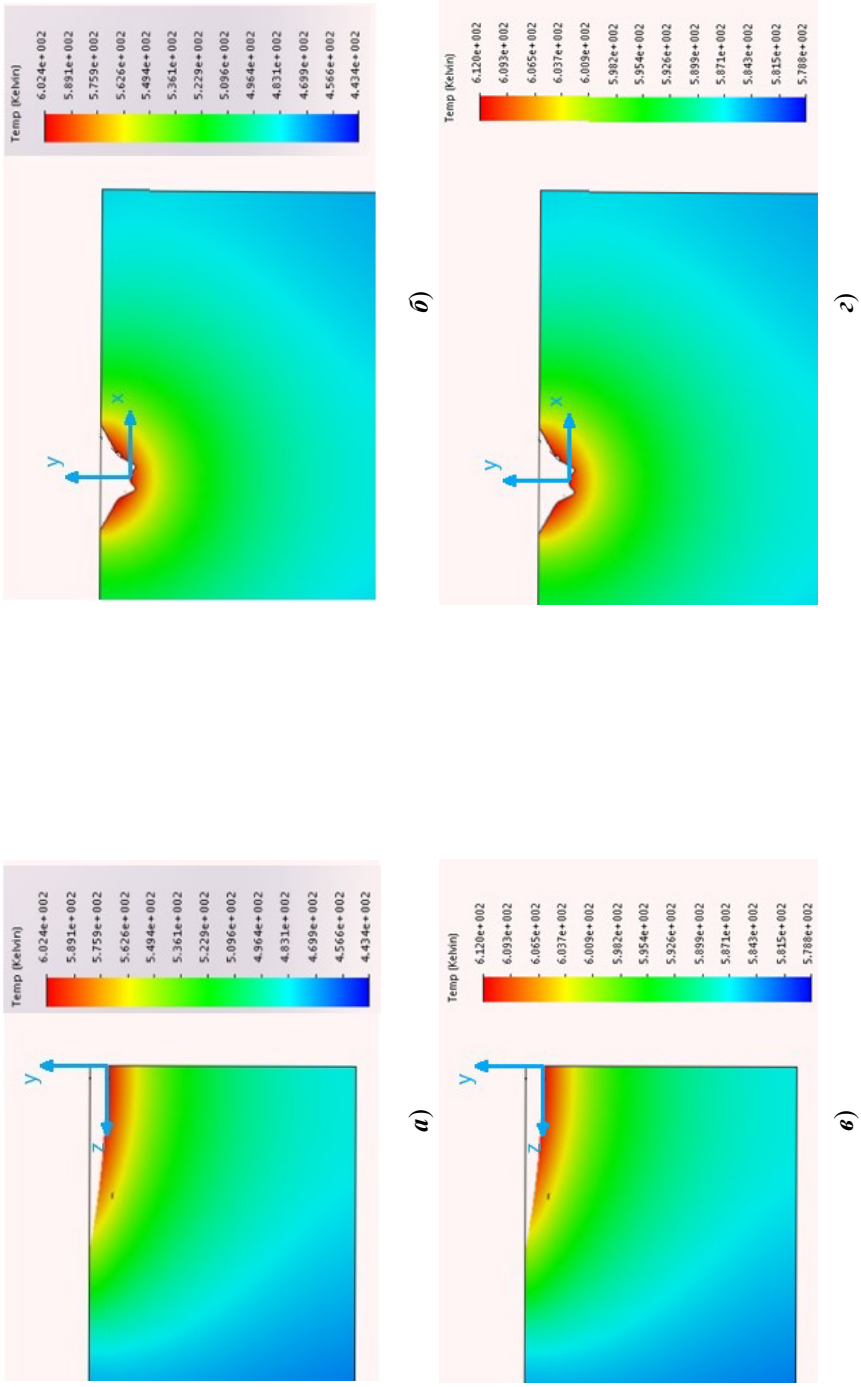


Рис. 5. Распределение температур в изделии, температура, T, К: ***а*** – для Т15К6 с СОЖ по длине дуги контакта; ***б*** – для Т15К6 с СОЖ по профилю образца; ***в*** – для ВК8 с СОЖ по длине дуги контакта; ***г*** – для ВК8 с СОЖ по профилю образца

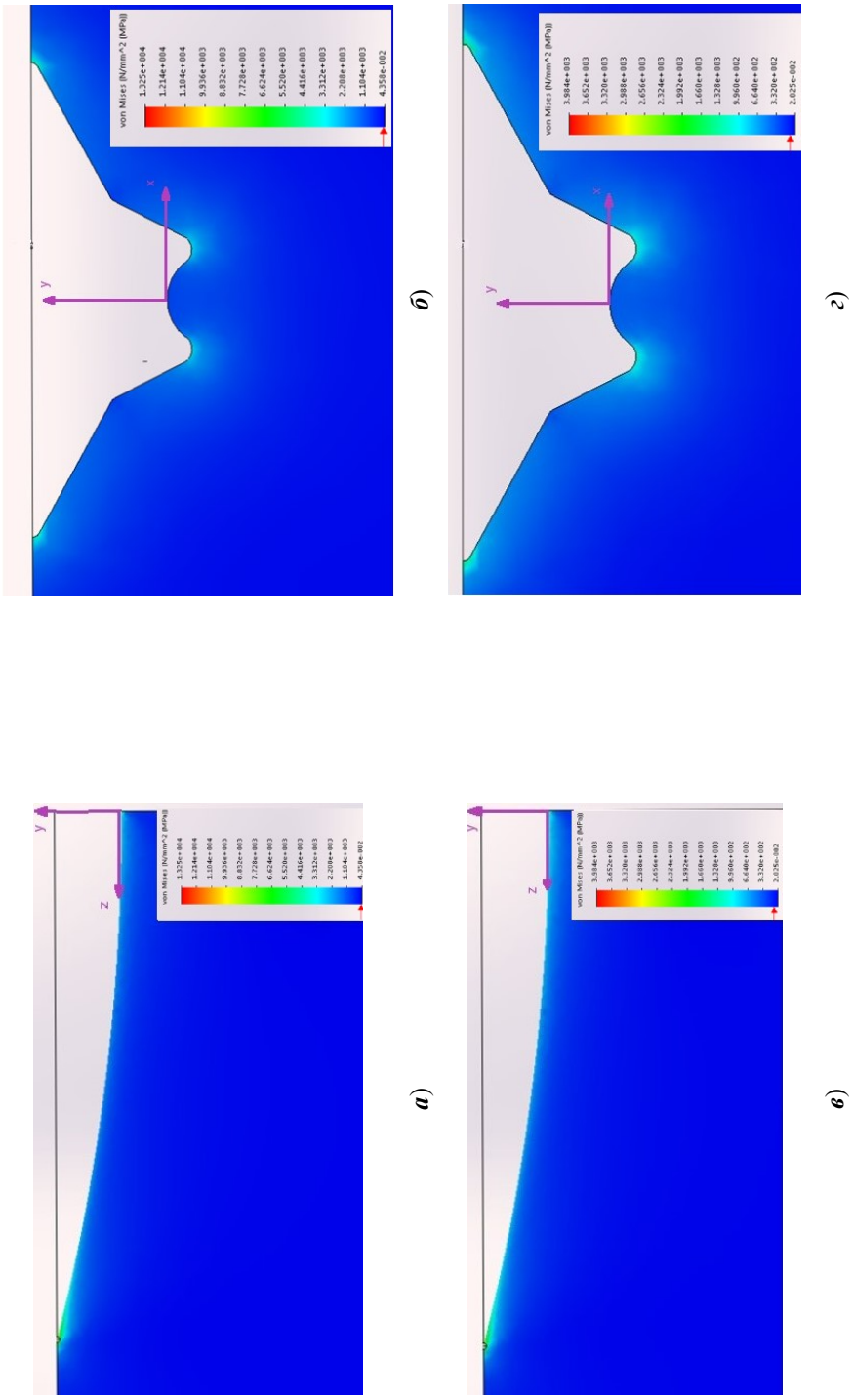
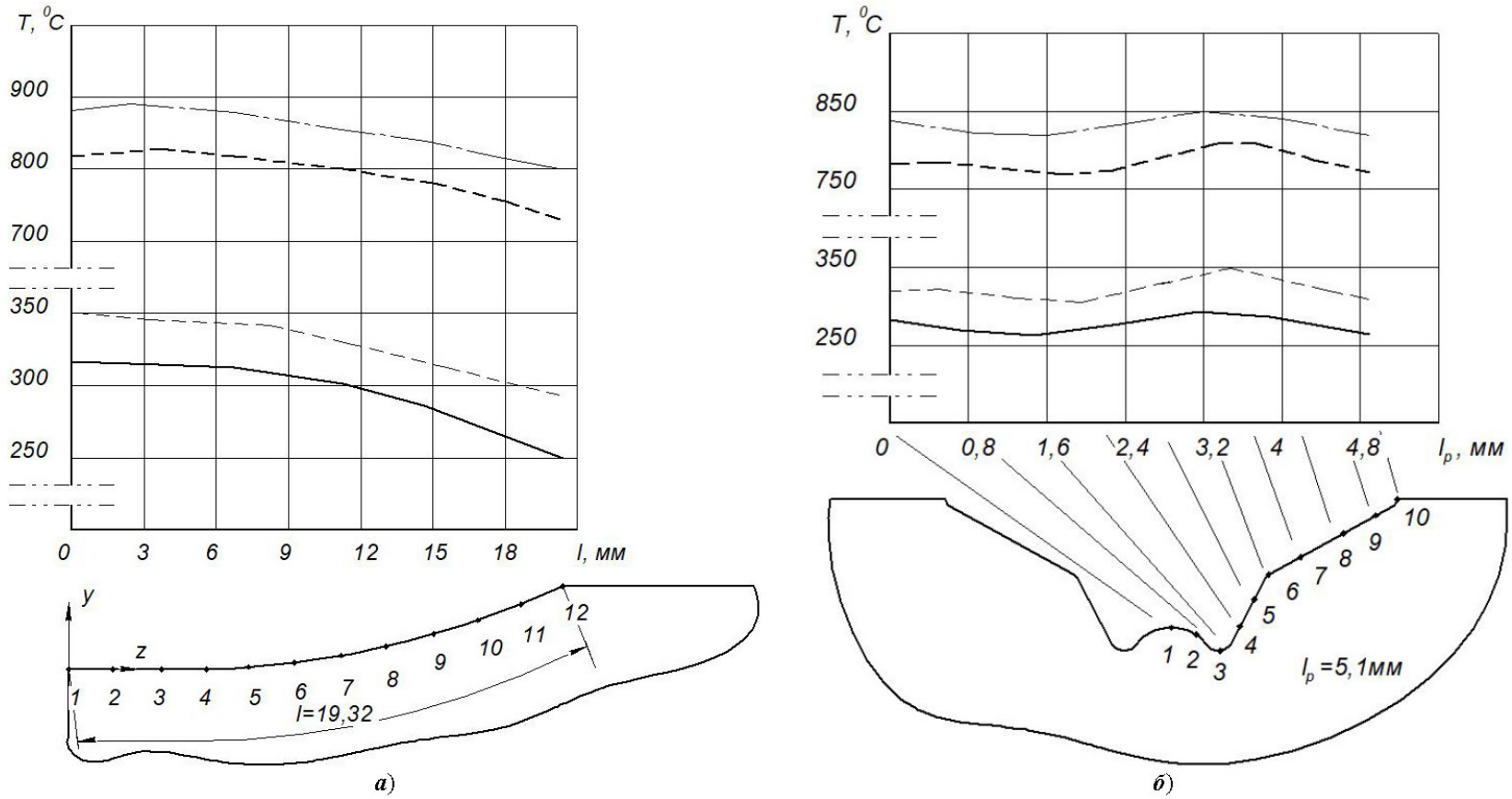


Рис. 6. Распределение температурных напряжений, МПа: ***а*** – для Т15К6 по длине дуги контакта;
б – для Т15К6 по профилю образца; ***в*** – для Т15К6 с СОЖ по длине дуги контакта; ***г*** – для Т15К6 с СОЖ по профилю образца



– для Т15К6 без СОЖ; – для Т15К6 с СОЖ; – для ВК8 без СОЖ; – для ВК8 с СОЖ

Рис. 7. Температура зоны резания, T °С: ***а*** – по длине дуги контакта; ***б*** – по профилю шлифуемого образца

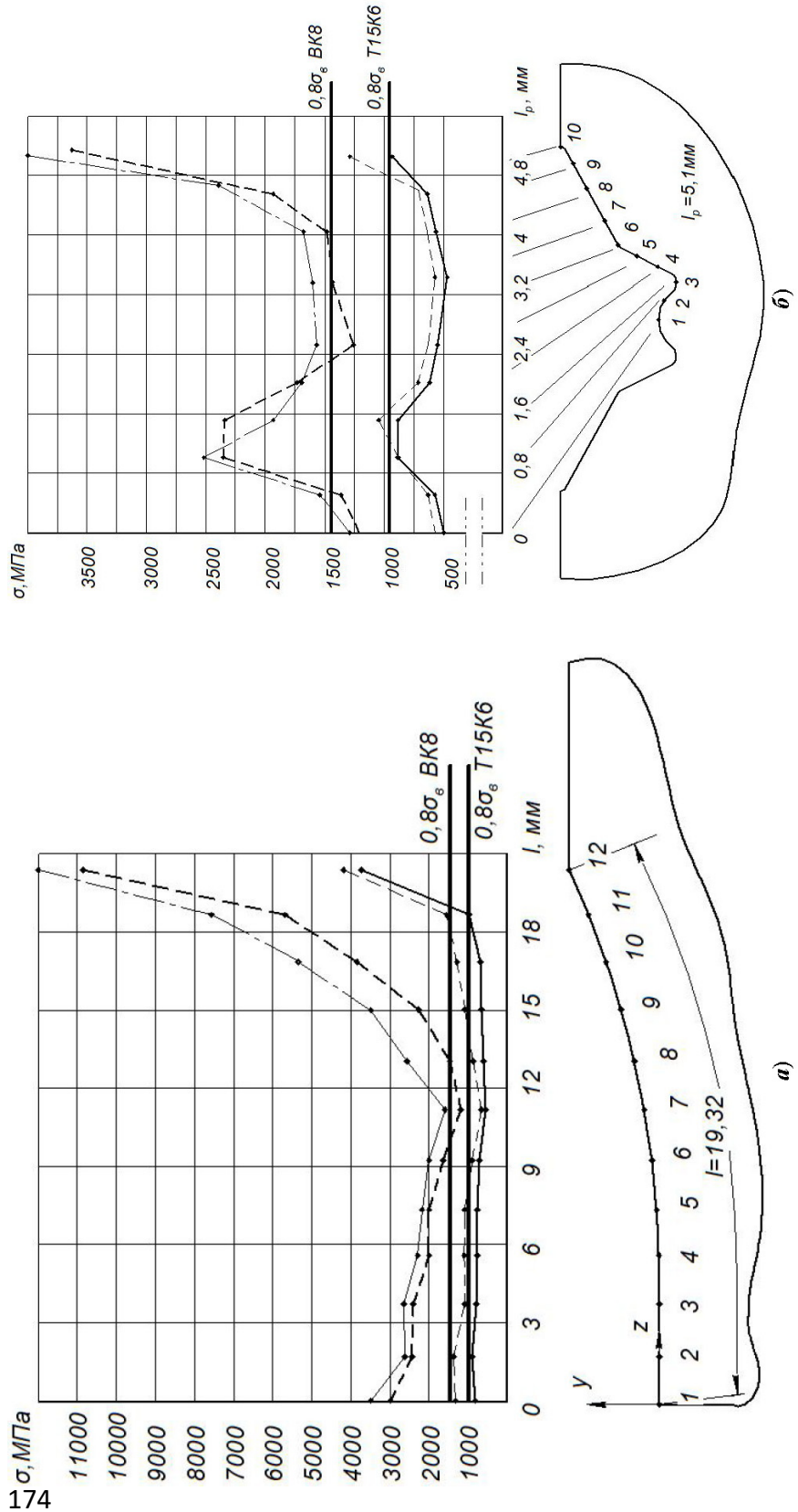
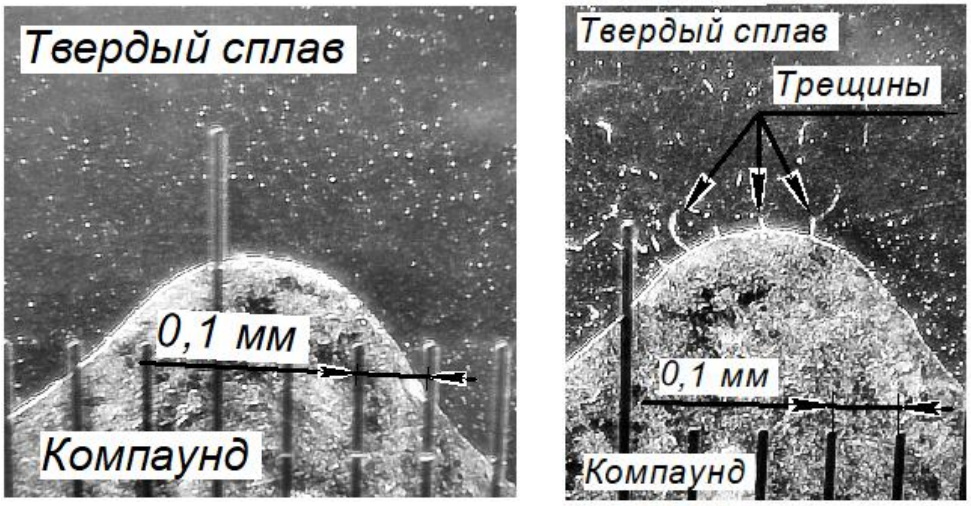


Рис. 8. Распределение напряжений, МПа: ***а*** – по длине дуги контакта; ***б*** – по профилю шлифуемого образца



а) ***б***)

Рис. 9. Фотографии микрошлифов: ***а*** – образец, обработанный на рекомендуемых режимах ($V_{кр}$ = 35 м/с, $V_{и}$ = 0,025 м/мин, t = 2,45 мм); ***б*** – образец, обработанный с превышением рекомендуемых режимов ($V_{кр}$ = 35 м/с, $V_{и}$ = 0,025 м/мин, t = 2,45 мм)

На рис. 8,***а*** показано распределение напряжений по дуге длины контакта алмазного круга с изделием. Поскольку зона вблизи точек 10–12 непрерывно удаляется при шлифовании, то для анализа представляют интерес напряжения на участке окончательного формирования профиля, т.е. точки *1–5* (рис. 8,***а***).

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

Поскольку проверка адекватности моделирования экспериментальным путем с замерами температур в различных зонах профиля, имеющего ограниченные размеры, является проблематичной, объективность результатов моделирования оценивалась косвенно по отсутствию дефектных участков на обработанных фрезах.

По результатам исследования микрошлифов (рис. 9) трещин на образце, обработанном с рекомендуемыми режимами, не обнаружено (рис. 9,***а***). На образце, обработанном с превышением рекомендуемых режимов, обнаружены микротрещины (рис. 9,***б***).

Заключение

Установлено, что предложенные режимы после проверки на теплонапряженность путем моделирования исключают образование трещин на обработанной поверхности.

Таким образом, предложенная методика позволяет проверить режимы шлифования при технологической подготовке серийного производства твердосплавных концевых фрез на предотвращение появления на профильной обрабатываемой поверхности таких дефектов, как микротрещины.

Список литературы

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. № 3 (77). С. 123–128.
2. 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. 2019. № 1 (224). С. 17–21.
3. Силин С. С., Леонов Б. Н., Хрульков В. А., Лобанов А. В., Полетаев В. А., Данченко Э. Б. Особенности глубинного шлифования титановых сплавов // Вестник машиностроения. 1989. № 1. С. 43–45.
4. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М. : Машиностроение, 1978. 167 с.
5. Долганов А. М., Иванова Т. Н. Исследование влияния теплообмена на температурное поле при шлифовании пластин по кромке // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 2. С. 186–189.
6. Волков Д. И., Полетаев В. А., Голованова А. М., Цветков Б. В. Определение изменений теплообмена в зоне обработки при высокоскоростном глубинном шлифовании // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2023. № 4 (67). С. 67–73.
7. Безъязычный В. Ф., Голованов Д. С. Качество поверхностного слоя деталей из титановых сплавов при глубинном шлифовании // Вестник РГТА имени П. А. Соловьева. 2017. № 3 (42). С. 65–69.
8. Янюшкин А. Р., Мулюхин Н. В., Секлетина Л. С. Исследования напряжений твердосплавных пластин после комбинированного электроалмазного шлифования // Современные технологии: проблемы и перспективы : сб. ст. всерос. науч.-практ. конф. для аспирантов, студентов и молодых ученых. Севастополь, 2019. С. 48–53.
9. Оберталина М. В. К решению нестационарной тепловой задачи при шлифовании методом конечных элементов // Современные информационные технологии. 2005. № 2. С. 140–141.
10. Воячек И. И., Кошелева Ю. Н. Определение сил резания при глубинном алмазном шлифовании // Современные проблемы машиностроения : тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. С. 243–245.
11. Худобин Л. В., Унянин А. Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / под ред. Л. В. Худобина. Ульяновск : УлГТУ, 2007. 298 с.
12. Зверовщиков А. Е., Кошелева Ю. Н. Исследование влияния смазочно-охлаждающей жидкости на процесс глубинного алмазного шлифования твердосплавных изделий // Актуальные проблемы станкостроения : сб. ст. по материалам II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Пенза, 23–25 октября 2025 г.) / под общ. ред. А. Е. Зверовщикова, С. А. Нестерова, Д. В. Кочеткова, Г. С. Большакова. Пенза : Изд-во ПГУ, 2025. С. 194–198.

References

1. Abdulgazis D.U., Abdulgazis U.A., Bratan S.M. Evaluation of the feasibility of using diamond grinding wheels for processing hard alloys in deep grinding mode. *Uchenyye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta = Proceedings of Krym Engineering and Pedagogical University*. 2022;(3):123–128. (In Russ.)
2. Koryazhkin A.A., Nosenko S.V., Nosenko V.A. Improving the efficiency of processing compressor blades made of titanium alloy using multi-axis deep grinding. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Volgograd State Technical University*. 2019;(1):17–21. (In Russ.)
3. Silin S.S., Leonov B.N., Khrulkov V.A., Lobanov A.V., Poletayev V.A., Danchenko E.B. Features of deep grinding of titanium alloys. *Vestnik ma-shinostroyeniya = Bulletin of mechanical engineering*. 1989;(1):43–45. (In Russ.)

4. Sipaylov V.A. *Teplovyye protsessy pri shlifovanii i upravleniye kachestvom poverkhnosti = Thermal processes in grinding and surface quality control*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1978:167. (In Russ.)
5. Dolganov A.M., Ivanova T.N. Studying influence of heat exchange on the temperature field during edge grinding of plates. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2012;(2):186–189. (In Russ.)
6. Volkov D.I., Poletayev V.A., Golovanova A.M., Tsvetkov B.V. Determination of changes in heat transfer in the processing zone during high-speed deep grinding. *Vestnik RGATA imeni P.A. Solovyeva = Bulletin of Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov*. 2023;(4):67–73. (In Russ.)
7. Bezyazychnyy V.F., Golovanov D.S. Surface layer quality of titanium alloy parts during deep grinding. *Vestnik RGTA imeni P.A. Solovyeva = Bulletin of Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov*. 2017;(3):65–69. (In Russ.)
8. Yanyushkin A.R., Mulyukhin N.V., Sekletina L.S. Stress studies of carbide plates after combined electrodiamond grinding. *Sovremennyye tekhnologii: problemy i perspektivy: sb. st. vseros. nauch.-prakt. konf. dlya aspirantov, studentov i molodykh uchenykh = Modern technologies: problems and prospects: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference for postgraduate students, students and young scientists*. Sevastopol, 2019:48–53. (In Russ.)
9. Obertalina M.V. Towards the solution of a non-stationary thermal problem in grinding using the finite element method. *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii = Modern information technologies.* 2005;(2):140–141. (In Russ.)
10. Voyachek I.I., Kosheleva Yu.N. Determination of cutting forces in deep diamond grinding. *Sovremennyye problemy mashinostroyeniya: tr. VI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. =* Modern problems of mechanical engineering: proceedings of the 6th International scientific and engineering conference. Tomsk: Izd-vo Tomsk. politekhn. un-ta, 2011:243–245. (In Russ.)
11. Khudobin L.V., Unyanin A.N. *Minimizatsiya zasalivaniya shlifovalnykh krugov = Minimizing clogging of grinding wheels*. Ulyanovsk: UlGTU, 2007:298. (In Russ.)
12. Zverovshchikov A.E., Kosheleva Yu.N. Studying the influence of cutting fluid on the process of deep diamond grinding of hard-alloy products. *Aktualnyye problemy stankostroyeniya: sb. st. po materialam II Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiyem (g. Penza, 23–25 oktyabrya 2025 g.) = Current issues in machine tool manufacturing: proceedings of the 2nd All-Russian scientific and practical conference with international participation (Penza, October 23-25, 2025)*. Penza: Izd-vo PGU, 2025:194–198. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Евгеньевич Зверовщиков
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий и оборудования машиностроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: azwer@mail.ru

Aleksandr E. Zverovshchikov
Doctor of engineering sciences, professor, head of the sub-department of technologies and equipment of mechanical engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Юлия Николаевна Кошелева
специалист по учебно-методической работе I категории учебно-методического управления, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: j231@mail.ru

Yulia N. Kosheleva
Specialist in educational and methodological work of the 1st category of the Educational and Methodological Department, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владимир Зиновьевич Зверовщиков
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий и оборудования машиностроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: wzzwer@mail.ru

Vladimir Z. Zverovshchikov
Doctor of engineering sciences, professor, professor of the sub-department of technologies and equipment of mechanical engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Герман Сергеевич Большаков
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий и оборудования машиностроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: geraman83@mail.ru

German S. Bolshakov
Candidate of engineering sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of technologies and equipment of mechanical engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Дмитрий Александрович Шелахаев
начальник технологического отдела, Научно-производственное предприятие «Новотех» (Россия, г. Пенза, ул. Гагарина, 11А, корп. 3)

E-mail: shelahaev@yandex.ru

Dmitriy A. Shelakhaev
Head of the technology department, Research and Production Enterprise “Novotech” (building 3, 11A Gagarina street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 27.02.2026

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 12.03.2026

Принята к публикации / Accepted 06.04.2026