

УДК 621.923

Исследование теплофизических характеристик профильного глубинного шлифования на основе конечно-элементного моделирования

А.Е. Зверовщиков, Ю.Н. Кошелева, В.З. Зверовщиков

ФГБОУ ВО Пензенский государственный университет

Investigation of thermophysical characteristics of profile deep grinding based on finite element modeling

A.E. Zverovshchikov, Y.N. Kosheleva, V.Z. Zverovshchikov

Penza State University

Профильное глубинное шлифование алмазными кругами относится к перспективным методам обработки изделий из твердых сплавов. Рассмотрены качественные характеристики поверхностного слоя образцов из твердых сплавов Т15К6 и ВК8 после профильного глубинного алмазного шлифования. Предметом исследования являлись контактные температуры и температурные напряжения в зоне обработки. Проведено исследование температур и температурных напряжений в зоне обработки при профильном глубинном алмазном шлифовании твердых сплавов для прогнозирования дефектности и качества поверхностного слоя. Моделирование выполнено для радиусного профиля глубинного алмазного шлифования твердого сплава с помощью программного обеспечения SolidWorks Simulation 2015. Разработана компьютерная модель температурного поля. Получены графики распределения температур и температурных напряжений по длине дуги контакта, профилю и глубине изделия. По результатам моделирования сделаны выводы о зонировании максимальной контактной температуры и градиента температур. Теоретически доказано, что применение смазочно-охлаждающей жидкости позволяет снизить температуру в зоне обработки до 30...40 %. Показано, что при шлифовании без смазочно-охлаждающей жидкости температурные напряжения превышают предел прочности материала.

EDN: TWEKGS, <https://elibrary/twekgs>**Ключевые слова:** глубинное алмазное шлифование, твердый сплав, метод конечных элементов, температурное поле, контактная температура, температурные напряжения

One of the promising methods of processing hard alloy products is profile deep grinding with diamond wheels. The object of the study is the qualitative characteristics of the surface layer of T15K6 and VK8 hard alloy samples after profiled deep diamond grinding. The subject of the study is contact temperatures and temperature stresses in the treatment area. The purpose of the work is to study temperatures and temperature stresses in the processing zone during profile deep diamond grinding of hard alloys to predict the defects and quality of the surface layer. The simulation was performed for the radius profile of deep diamond grinding of a hard alloy using the SolidWorks Simulation 2015 software. A computer model of the temperature field has been developed and graphical dependences of the distribution of temperatures and temperature stresses along the length of the contact arc, along the profile of the sample and along the depth of the product have been obtained. Based on the simulation results, conclusions are drawn about the zoning of the maximum contact temperature and temperature gradient. It has been theoretically proven

that the use of COOLANT makes it possible to reduce temperatures in the treatment area by up to 30–40 %. When grinding without coolant, the temperature stresses exceed the ultimate strength of the material.

EDN: TWEKGS, <https://elibrary/twekgs>

Keywords: deep diamond grinding, hard alloy, finite element method, temperature field, contact temperature, temperature stresses

В машиностроении достаточно широко распространены изделия сложной конфигурации из таких труднообрабатываемых материалов, как твердые сплавы. Профильное глубинное шлифование алмазными кругами — один из перспективных методов обработки таких материалов, позволяющий повысить производительность обработки по сравнению с многопроходным шлифованием [1–4].

Однако процесс глубинного шлифования сопровождается повышенными температурами в зоне резания, что может негативно сказаться на качестве готового изделия [3–7]. Тепловые воздействия на поверхностные слои материала могут привести к возникновению прижогов, макро- и микротрещин [5, 8–11].

Следовательно, чтобы избежать возникновения дефектов поверхностного слоя при глубинном шлифовании, необходимо знать характер распределения температурного поля в зоне обработки.

Цель работы — исследование температур и температурных напряжений в зоне обработки при профильном глубинном алмазном шлифовании твердых сплавов для прогнозирования дефектности и качества поверхностного слоя.

Моделирование выполнено для радиусного профиля глубинного алмазного шлифования твердого сплава с помощью программного обеспечения SolidWorks Simulation.

Моделирование температурного поля в обрабатываемом изделии проведено для профильного глубинного шлифования периферией круга. Выбран радиусный профиль шириной $B = 10$ мм и глубиной $t = 3$ мм. Это обусловлено тем, что большинство кривых можно представить как совокупность частей окружности. Исследованы распределение температуры по профилю шлифуемой поверхности, температурное поле и температурные напряжения для твердых сплавов Т15К6 и ВК8.

Моделирование методом конечных элементов выполнено с помощью программного обеспечения SolidWorks Simulation 2015.

Для моделирования выбран образец размером $400 \times 400 \times 200$ мм с дугой контакта, полу-

ченной от шлифовального круга диаметром 250 мм (рис. 1).

После автоматической генерации и разбиения рассматриваемой области построена линейная упругая изотропная конечно-элементная модель шлифуемого образца (см. рис. 1). Метод разбиения — сетка на основе кривизны. Максимальный размер элемента — 3 мм, минимальный — 0,1 мм.

Приняты следующие граничные условия и нагрузки: в начальный момент времени температура шлифуемого образца равна температуре внешней среды; по поверхности контакта шлифовального круга с изделием равномерно распределен тепловой поток плотностью q , на остальных поверхностях происходит конвективный теплообмен с воздухом.

Плотность теплового потока [12, 13]

$$q = \frac{P_z v_{кр}}{F},$$

где P_z — тангенциальная составляющая силы резания, возникающая при шлифовании, Н; $v_{кр}$ — скорость шлифовального круга, м/с; F — площадь шлифования, м².

Также смоделирован процесс шлифования со смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ), где конвективный теплообмен происходит с СОЖ по закону Ньютона—Рихмана [12, 13].

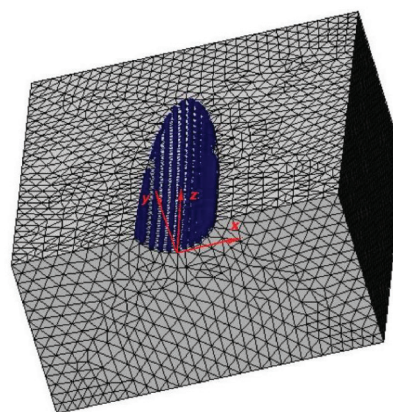


Рис. 1. Конечно-элементная модель шлифуемого образца

Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м²·К), можно выразить из выражения для критерия Нуссельта [12]

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda},$$

где l — линейный размер изделия, м; λ — коэффициент теплопроводности СОЖ, Вт/(м·К).

В среде SolidWorks Simulation построены температурные поля для твердых сплавов Т15К6 и ВК8. Распределение температуры твердого сплава по длине дуги контакта (вдоль оси z) шлифовального круга с образцом твердого сплава Т15К6 и по профилю образца (вдоль оси x) показано на рис. 2.

По результатам моделирования температурных полей построены графики распределения температуры по длине дуги контакта l , по профилю l_g и глубине l_p шлифуемого образца из твердых сплавов Т15К6 и ВК8 (рис. 3, а–в).

Анализ результатов моделирования позволяет заключить, что максимальная контактная температура имеет место во второй точке дуги контакта шлифовального круга с образцом

(см. рис. 3, а). Здесь градиент температур максимален, а температура достигает 1200 °С (при шлифовании Т15К6 без СОЖ).

По профилю образца температура снижается от наибольшей глубины шлифования к краям радиусного профиля. Наибольший градиент температур наблюдается около края шлифуемого профиля.

Таким образом, наибольшая вероятность появления трещин в центре радиусного профиля и у его края. Применение СОЖ позволяет существенно снизить температуру в зоне обработки (до 30...40 %). Максимальная температура составила 1200 °С (при шлифовании Т15К6 без СОЖ). Известно, что при контактной температуре более 600 °С возникает вероятность появления трещин [12, 13].

С помощью метода конечных элементов определены напряжения, возникающие в образце под действием теплового поля и сил резания каждого алмазного зерна.

Размеры образца и режимы шлифования выбраны такими же, как и при температурном

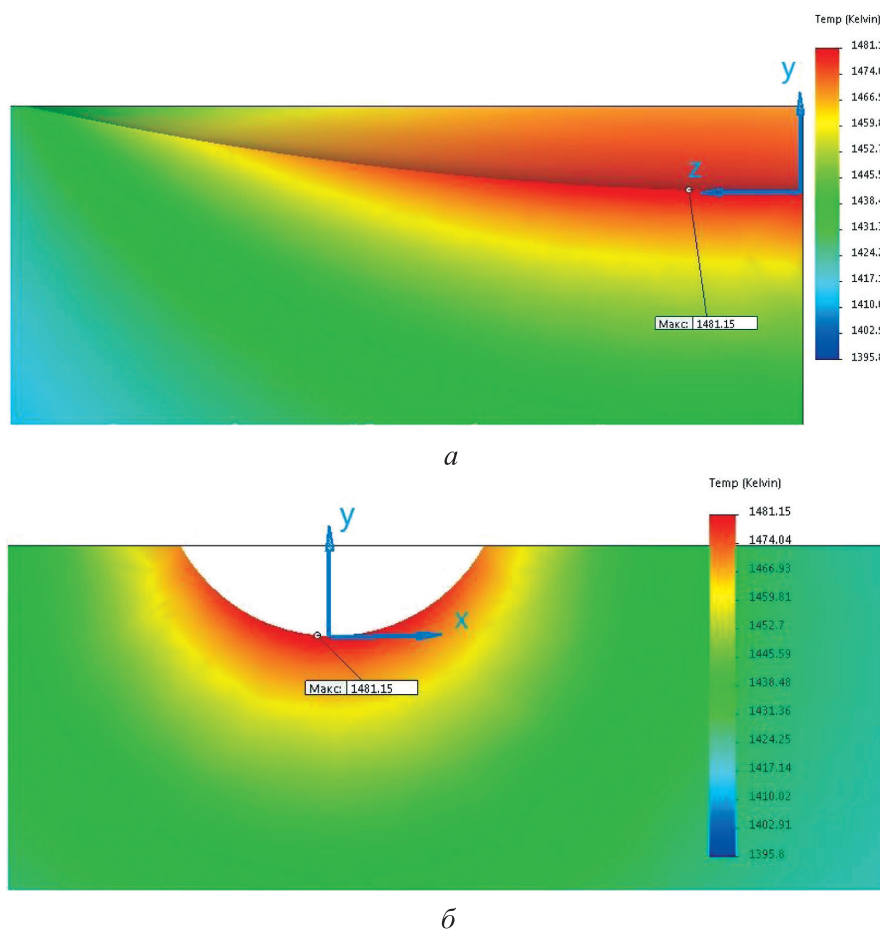


Рис. 2. Распределение температуры, К, по длине дуги контакта шлифовального круга с образцом твердого сплава Т15К6 (а) и по его профилю (б)

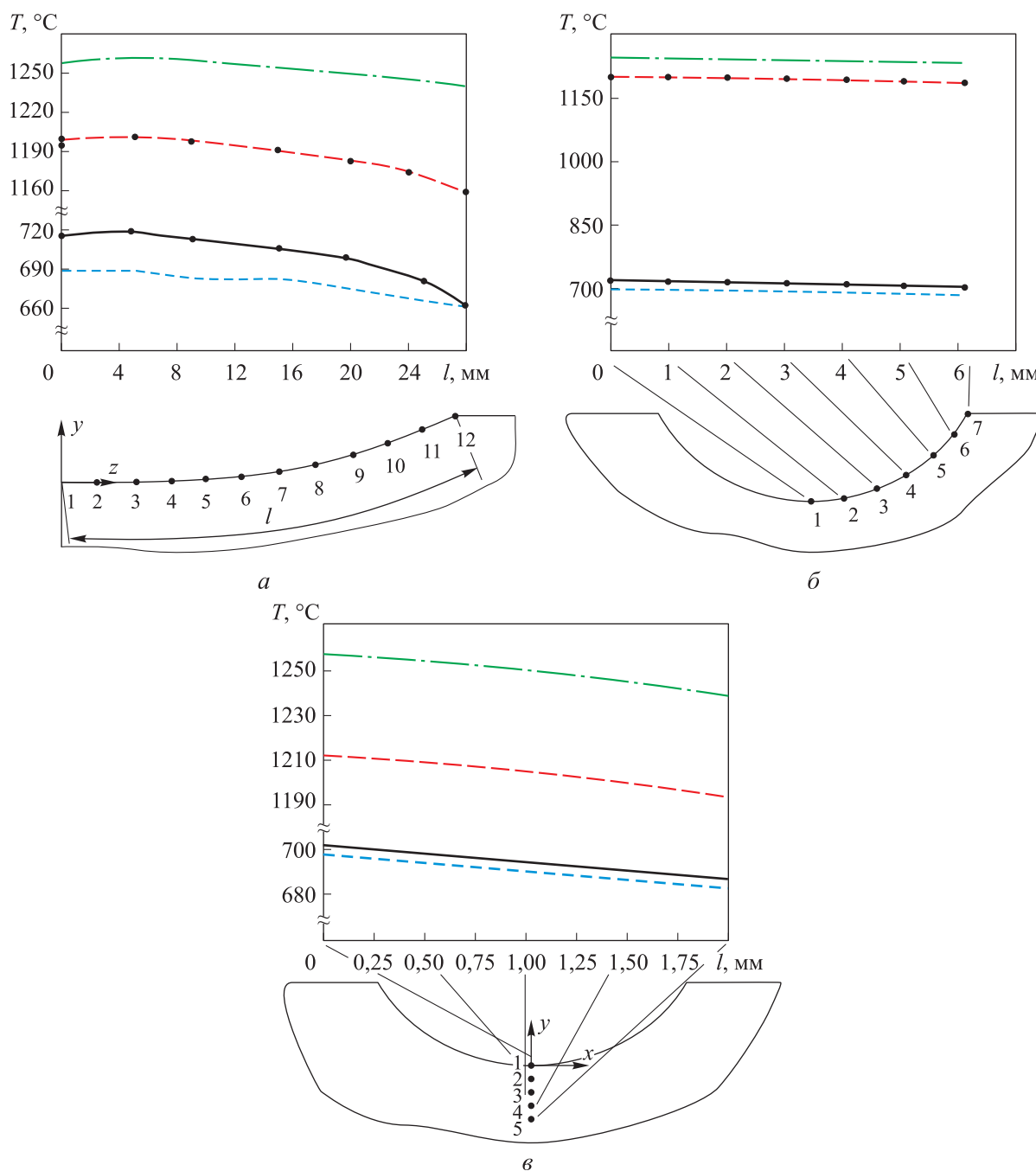


Рис. 3. Распределение температуры T по длине дуги контакта l (а), профилю l_p (б) и глубине l_g (в) шлифуемого образца из различных твердых сплавов:

— и — T15K6 и BK8 без применения СОЖ; — и — T15K6 и BK8 с применением СОЖ

моделировании. В среде SolidWorks Simulation выбран статический анализ. В качестве нагрузок к образцу прикладывались тепловое поле из температурного исследования и силы резания единичным зерном к каждой поверхности зоны контакта шлифовального круга с образцом, приходящейся на одно режущее зерно.

Для приложения сил резания единичным зерном поверхность зоны контакта с из-

делием разбивалась на элементарные поверхности, к каждой из которых прикладывалась сила резания единичным зерном P_{z1} .

Для исследования процесса резания единичным зерном можно применить теорию линий скольжения [14, 15].

Нормальное p_n и касательное τ напряжения для поля линий скольжения вычисляются по формулам [15]

$$p_n = 2k_{cd} \left(0,5 + \frac{\pi}{4} + 0,5 \sin 2\alpha_b \right);$$

$$\tau = k_{cd} \cos 2\alpha_b,$$

где k_{cd} — постоянная сдвига материала, $k_{cd} = \sigma_t/2$ (σ_t — предел текучести, принятый для твердого сплава равным пределу прочности на растяжение σ_b), МПа; $\alpha_b = 90 - \beta/2$ (β — угол при вершине зерна).

Напряжения p_n и τ зависят от геометрических характеристик режущих зерен, а также от толщины слоя, снимаемого единичным зерном a_z , мкм.

Толщина среза, приходящаяся на одно режущее зерно, определяется выражением [15]

$$a_{z\text{ ср}} = 2000 \frac{\alpha_3^{0,37}}{(\operatorname{tg} \gamma)^{0,25}} \frac{(1-\varepsilon)^{0,25} \bar{x}}{K^{0,25}} \left(\frac{\omega}{1000\nu} \right)^{0,25},$$

где α_3 — коэффициент формы зерна; γ — половина угла при вершине режущего зерна; ε — относительная критическая глубина заделки зерна, мкм; K — концентрация алмазного порошка; $\bar{x}$ — средний размер зерна; ω — удельная производительность шлифования, м/с; ν — скорость шлифования, м/с.

Удельная производительность шлифования

$$\omega = \frac{1000}{60} \nu_n \sqrt{\frac{t}{D}},$$

где ν_n — скорость подачи изделия, м/мин; D — диаметр шлифовального круга, мм; t — глубина шлифования, мм.

Средний размер зерна

$$\bar{x} = 0,5(h_b + h_n)\eta,$$

где h_b и h_n — размер ячейки верхнего и нижнего сита в свету, мкм; η — поправочный коэффициент на размер зерна.

По результатам моделирования построены графики распределения напряжений по длине дуги контакта, профилю и глубине шлифуемого образца из твердых сплавов Т15К6 и ВК8 (рис. 4, а–е). Чтобы показать вклад температурных явлений и силового фактора в формирование напряженного состояния, построены графические зависимости при приложении только температурного поля и при воздействии температурного поля и силы резания. Максимального значения напряжения достигают в начале дуги контакта алмазного круга с образцом — в точке 12 (см. рис. 4, а и б). Эта зона в процессе обработки уйдет в стружку. Также рост напряжений наблюдается в точке 2, где получены

наибольшие температуры при температурном исследовании.

Как видно из рис. 4, а и б, по длине дуги контакта временные напряжения распределены сложным образом, наиболее нагруженной точкой является зона выхода шлифовального круга, где возможно возникновение дефектов — прижогов и микротрещин. Однако эти слои материала уйдут в стружку при дальнейшей обработке, поэтому наибольший интерес представляет характер распределения напряжений в конечной половине длины дуги контакта — в точках 1–5. Наиболее нагруженным местом дуги контакта является сечение, находящееся в 4 мм от края образца. В этом срезе сняты значения напряжений для построения графика по профилю шлифуемого образца.

Анализ графика распределения напряжений по профилю шлифуемого образца показывает, что наибольшие напряжения испытывает точка 6 (см. рис. 4, в и г), находящаяся у края профиля. Здесь наиболее вероятно появление дефектов обработки.

Согласно графику распределения напряжений по глубине образца (см. рис. 4, д и е), наибольшие напряжения возникают на обрабатываемой поверхности.

Как видно из графических зависимостей, напряжения, возникающие под действием силы резания, вносят вклад в общую картину напряженного состояния и меняют характер кривых на графиках. Следовательно, их необходимо учитывать.

Все графические зависимости построены для двух схем шлифования — с применением и без применения СОЖ. При шлифовании без СОЖ возникают напряжения, превышающие предел прочности твердых сплавов, а значит, для выбранных режимов обработки необходимо использовать СОЖ.

Напряжения, возникающие при шлифовании с применением СОЖ твердого сплава Т15К6 превышают предел прочности, следовательно, решить проблему возникновения прижогов и микротрещин введением СОЖ в зону обработки не получится. Необходимо изменить режимы шлифования или разбить максимальную глубину шлифования t на два прохода.

Напряжения, возникающие при шлифовании с применением СОЖ твердого сплава ВК8, превышают предел прочности только в одной точке профиля (см. рис. 4, г). Так как превышение незначительное (50 МПа), а с учетом того,

что графическая зависимость построена в сечении 2 мм от края шлифуемого образца, и этот слой материала уйдет в припуск при обработке,

можно считать, что применение СОЖ обеспечит заданное качество шлифуемой поверхности при обработке образца из ВК8.

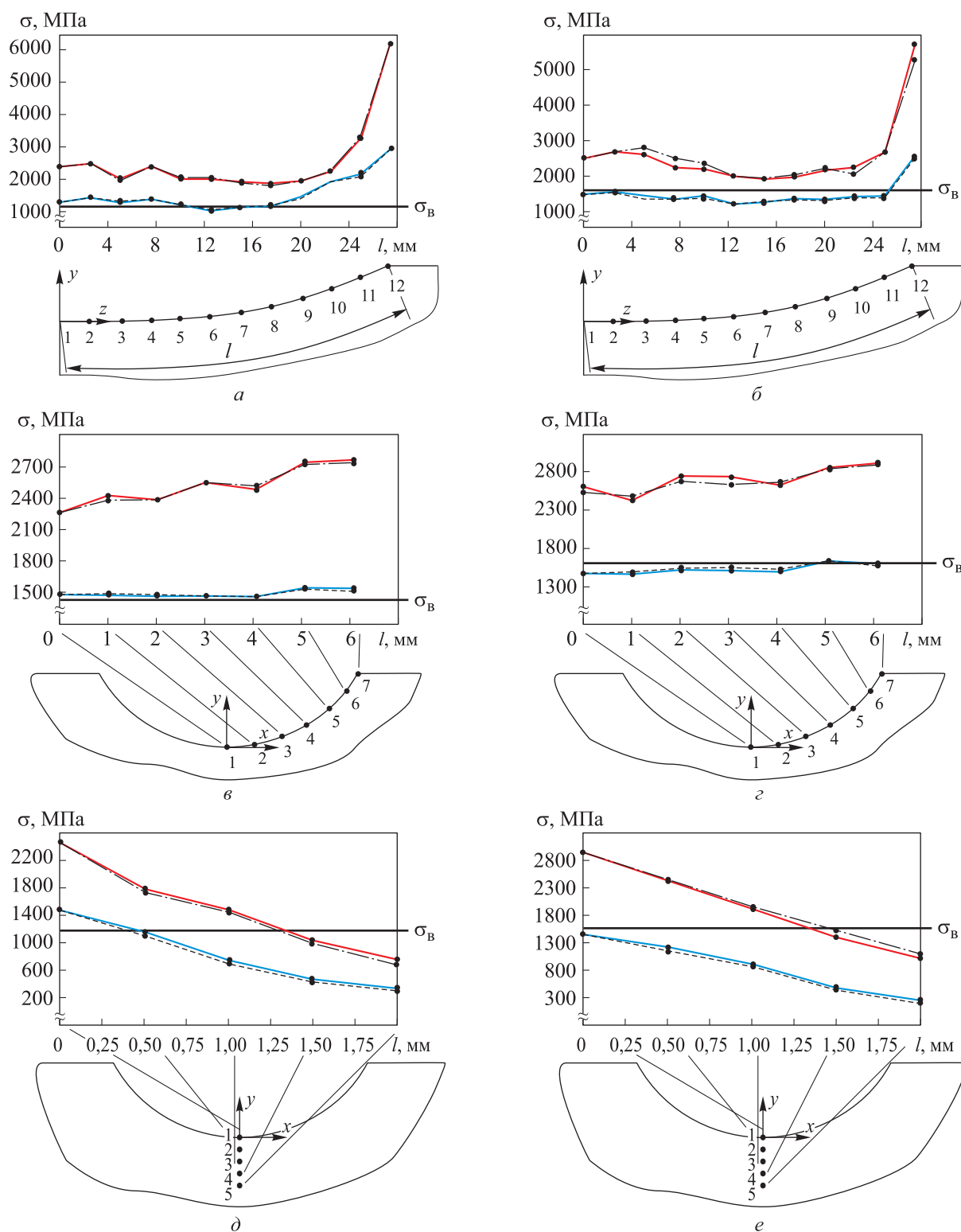


Рис. 4. Распределение параметров по длине дуги контакта (а, б), профилю (в, г) и глубине шлифуемого образца (д, е) из твердых сплавов Т15К6 (а, в, д) и ВК8 (б, г, е):
— и — суммарных напряжений без применения и с применением СОЖ;
--- и ---- температурных напряжений без применения и с применением СОЖ

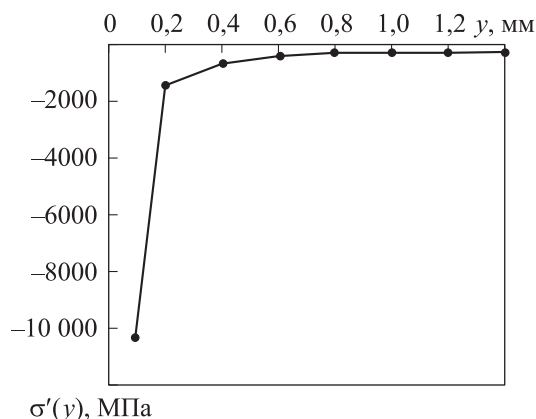


Рис. 5. Зависимость градиента напряжений σ' от глубины шлифуемого образца

Для анализа вероятности трещинообразования использован градиент напряжений, возникающих по глубине поверхностного слоя. На основе расчетных значений напряжений построена следующая регрессионная модель с доверительной вероятностью 80 %:

$$\sigma = \frac{4,857}{y^2} - 408,11y + 1315,2.$$

Эта зависимость справедлива для диапазона глубины шлифования $t = 0,01 \dots 2,00$ мм. С помощью такой модели найдена формула для градиента напряжений по глубине поверхностного слоя

$$\sigma'(y) = \frac{204055y^3 + 4857}{500y^3}.$$

Анализ графической зависимости градиента напряжений от глубины шлифуемого образца (рис. 5) показывает, что в поверхностном слое до глубины 0,4 мм имеет место сильный скачок напряжений, что является предпосылкой для возникновения трещины. В более глубоких слоях напряжения изменяются равномерно, следовательно, возникновение трещин маловероятно.

Выводы

1. Предложена методика моделирования, которая не противоречит известным экспериментальным исследованиям и производственному опыту, позволяя определять наиболее проблемные участки зоны обработки при глубинном алмазном шлифовании.

2. Предложенная методика дает возможность прогнозирования состояния поверхностного слоя твердого сплава при различных входных параметрах (зернистость круга, режимы резания, наличие СОЖ). Теоретически обосновано, что применение СОЖ при шлифовании резко снижает вероятность образования трещин в поверхностном слое изделия.

Литература

- [1] Абдулгасис Д.У., Абдулгасис 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, с. 123–128, doi: <https://doi.org/10.34771/UZCEPU.2022.77.3.024>
- [2] Якимов А.В. *Оптимизация процессов шлифования*. Москва, Машиностроение, 1975. 176 с.
- [3] Горбунова И.А., Пиралишвили Ш.А., Волков Д.И. Теоретико-экспериментальное моделирование тепловых процессов в поверхностных слоях заготовки при глубинном шлифовании. *Справочник. Инженерный журнал*, 2005, № 3, с. 29–33.
- [4] Худобин Л.В. *Смазочно-охлаждающие средства, применяемые при шлифовании*. Москва, Машиностроение, 1971. 217 с.
- [5] Безъязычный В.Ф., Голованов Д.С. Качество поверхностного слоя деталей из титановых сплавов при глубинном шлифовании. *Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева*, 2017, № 3, с. 22–23.
- [6] Волков Д.И., Цветков Б.В., Голованова А.М. Моделирование подачи охлаждающей жидкости в зону обработки при высокоскоростном глубинном шлифовании. *Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева*, 2024, № 2, с. 89–95.
- [7] Силин С.С., Леонов Б.Н., Хрульков В.А. и др. Особенности глубинного шлифования титановых сплавов. *Вестник машиностроения*, 1989, № 1, с. 43–45.
- [8] Янюшкин А.Р., Мулюхин Н.В., Секлетина Л.С. Исследования напряжений твердо-сплавных пластин после комбинированного электроалмазного шлифования. *Совре-*

- менные технологии: проблемы и перспективы. Сб. ст. всерос. науч.-практ. конф. для аспирантов, студентов и молодых ученых, 2019, с. 48–53.
- [9] Баженов М.Ф., Байчман С.Г., Карпачев Д.Г. *Твердые сплавы*. Москва, Металлургия, 1978. 184 с.
- [10] Гусев В.Г., Калиновская Е.В. Моделирование температуры обрабатываемой поверхности при комбинированном плоском периферийном шлифовании. *Научно-технические технологии в машиностроении*, 2018, № 6, с. 23–30.
- [11] Резников А.Н., ред. *Абразивная и алмазная обработка материалов*. Москва, Машиностроение, 1977. 391 с.
- [12] Сипайлов В.А. *Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности*. Москва, Машиностроение, 1978. 167 с.
- [13] Ящерицын П.И., Цокур А.К., Еременко М.Л. *Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей*. Минск, Наука и техника, 1973. 182 с.
- [14] Кожевникова Г.В. *Теория и практика поперечно-клиновой прокатки*. Минск, Беларуская навука, 2010. 291 с.
- [15] Кошелева Ю.Н., Воячек И.И., Муйземнек А.Ю. Выбор режимов алмазного глубинного шлифования труднообрабатываемых материалов из условия сохранения режущей способности круга. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*, 2013, № 1, с. 94–101.

References

- [1] Abdulgaziz D.U., Abdulgaziz U.A., Bratan S.M. Evaluation of the feasibility of application of diamond grinding wheels for processing hard alloys in the mode of deep grinding. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta* [Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University], 2022, no. 3, pp. 123–128, doi: <https://doi.org/10.34771/UZCEPU.2022.77.3.024> (in Russ.).
- [2] Yakimov A.V. *Optimizatsiya protsessov shlifovaniya* [Optimization of grinding processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 176 p. (In Russ.).
- [3] Gorbunova I.A., Piralishvili Sh.A., Volkov D.I. Theoretical and experimental modeling of thermal processes in the surface layers of a workpiece during deep grinding. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* [Handbook. An Engineering journal], 2005, no. 3, pp. 29–33. (In Russ.).
- [4] Khudobin L.V. *Smazочно-okhlazhdayushchie sredstva, primenyaemye pri shlifovanii* [Cooling lubricants used in grinding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 217 p. (In Russ.).
- [5] Bezyazychnyy V.F., Golovanov D.S. Quality of surface layer of titanium alloys details at creep feed grinding. *Vestnik RGATU im. P.A. Solovyeva*, 2017, no. 3, pp. 22–23. (In Russ.).
- [6] Volkov D.I., Tsvetkov B.V., Golovanova A.M. Modeling coolant supply to the cutting area under high-speed creep feed grinding. *Vestnik RGATU im. P.A. Solovyeva*, 2024, no. 2, pp. 89–95. (In Russ.).
- [7] Silin S.S., Leonov B.N., Khrulkov V.A. et al. Features of deep grinding of titanium alloys. *Vestnik mashinostroeniya*, 1989, no. 1, pp. 43–45. (In Russ.).
- [8] Yanyushkin A.R., Mulyukhin N.V., Sekletina L.S. [Improving the efficiency of grinding carbide and mineral ceramics with a combined electro-diamond method]. *Sovremennyye tekhnologii: problemy i perspektivy. Sb. st. vsenos. nauch.-prakt. konf. dlya aspirantov, studentov i molodykh uchenykh* [Modern Technologies: Problems and Prospects. Proc. Russ. Sci.-Pract. Conf. For Postgraduates, Students and Young Scientists], 2019, pp. 48–53. (In Russ.).
- [9] Bazhenov M.F., Baychman S.G., Karpachev D.G. *Tverdye splavy* [Hard alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 184 p. (In Russ.).
- [10] Gusev V.G., Kalinovskaya E.V. Temperature simulation of surface worked at combined flat peripheral grinding. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2018, no. 6, pp. 23–30. (In Russ.).
- [11] Reznikov A.N., ed. *Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov* [Abrasive and diamond processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 391 p. (In Russ.).

- [12] Sipaylov V.A. *Teplovye protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti* [Thermal processes in grinding and surface quality control]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 167 p. (In Russ.).
- [13] Yashcheritsyn P.I., Tsokur A.K., Eremenko M.L. *Teplovye yavleniya pri shlifovanii i svoystva obrabotannykh poverkhnostey* [Thermal phenomena during grinding and properties of processed surfaces]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1973. 182 p. (In Russ.).
- [14] Kozhevnikova G.V. *Teoriya i praktika poperechno-klinovoy prokatki* [Theory and practice of cross-wedge rolling]. Minsk, Belarus. Navuka Publ., 2010. 291 p. (In Russ.).
- [15] Kosheleva Yu.N., Voyachek I.I., Muzyemnek A.Yu. Selecting the modes of deep diamond grinding of churlish materials for retaining circle's cutting capacity. *Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences], 2013, no. 1, pp. 94–101. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 16.09.2025

Информация об авторах

ЗВЕРОВЩИКОВ Александр Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и оборудование машиностроения». ФГБОУ ВО Пензенский государственный университет (440026, Пенза, Российская Федерация, ул. Красная, д. 40, e-mail: azwer@mail.ru).

КОШЕЛЕВА Юлия Николаевна — специалист по учебно-методической работе первой категории Учебно-методического управления. ФГБОУ ВО Пензенский государственный университет (440026, Пенза, Российская Федерация, ул. Красная, д. 40, e-mail: j231@mail.ru).

ЗВЕРОВЩИКОВ Владимир Зиновьевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии и оборудование машиностроения». ФГБОУ ВО Пензенский государственный университет (440026, Пенза, Российская Федерация, ул. Красная, д. 40, e-mail: tmspgu@mail.ru).

Information about the authors

ZVEROVSHCHIKOV Alexander Evgenievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering. Penza State University (440026, Penza, Russian Federation, Krasnaya St., Bldg. 40, e-mail: azwer@mail.ru).

KOSHELEVA Yulia Nikolaevna — Specialist in educational and methodical work of the 1st category of Educational and methodical management. Penza State University (440026, Penza, Russian Federation, Krasnaya St., Bldg. 40, e-mail: j231@mail.ru).

ZVEROVSHCHIKOV Vladimir Zinovievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering. Penza State University (440026, Penza, Russian Federation, Krasnaya St., Bldg. 40, e-mail: tmspgu@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зверовщиков А.Е., Кошелева Ю.Н., Зверовщиков В.З. Исследование теплофизических характеристик профильного глубинного шлифования на основе конечно-элементного моделирования. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 5, с. 77–85.

Please cite this article in English as:

Zverovshchikov A.E., Kosheleva Y.N., Zverovshchikov V.Z. Investigation of thermophysical characteristics of profile deep grinding based on finite element modeling. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 5, pp. 77–85.