

Моделирование в системе Ansys растравленного слоя при комбинированной электроалмазной обработке

Н.О. Малышев^{1а}, В.Ю. Попов^{1б}, А.С. Яньюшкин^{2с}, С.Ю. Звядинцева^{1д}, А.Н. Хлыстов^{1е}

¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

² Чувашский государственный университет, пр. Московский, 15, Чебоксары, Чувашская Республика

^а pokosnik135@gmail.com, ^б slapopov@gmail.com, ^с yanyushkinas@mail.ru,

^д klyovo1@mail.ru, ^е alexey.khlystov@gmail.com

^а <https://orcid.org/0000-0003-2489-1170>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-6299-9161>, ^с <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>,

^д <https://orcid.org/0000-0002-6076-9765>, ^е <https://orcid.org/0000-0003-3017-9788>

Статья поступила 12.04.2024, принята 17.05.2024

Развитие искусственного интеллекта практически во всех сферах человеческой интеллектуальной деятельности предполагает расширение инструментов инженерного анализа, а также увеличение темпов роста программного обеспечения в области машиностроения. Главным преимуществом этого станет сокращение экономических затрат на разработку машиностроительной продукции, ее физические испытания и отбраковку физических прототипов. В данной статье представлены результаты моделирования растравленного слоя поверхности быстрорежущей стали Р6М5 в результате воздействия на нее электрических факторов процесса резания и электролита. Созданы контактирующие поверхности — модель алмазного зерна как элемент алмазного шлифовального круга и модель обрабатываемой поверхности быстрорежущей стали Р6М5 как элемент металлорежущего инструмента. Для решения задачи контактного взаимодействия при комбинированной электроалмазной обработке двух ювенильных поверхностей была выбрана универсальная программная система конечно-элементного анализа Ansys Workbench. Основное моделирование процесса резания было проведено на трех величинах глубины резания t : 0,01; 0,02 и 0,03 мм/дв.ход. Было учтено влияние на модель обрабатываемой поверхности двух электрических факторов обработки — плотности тока правки $i_{пр} = 0,25$ А/см², плотности тока растравливания $i_{тр} = 6,25$ А/см² и воздействие электролита. Были учтены результаты сравнительного анализа химического состава передней поверхности быстрорежущих пластин до и после электрохимической обработки. Сделан вывод о том, что характеристики растравленного слоя во время комбинированной электроалмазной обработки уменьшаются в своих свойствах примерно на 10 %, что и вызывает эффект растравливания поверхности. В результате комплексных исследований была решена задача выбора и моделирования такой структуры, которая бы имитировала механические свойства материала растравленного слоя обрабатываемой поверхности быстрорежущей стали при комбинированной электроалмазной обработке. Моделирование показывает, что оптимальная глубина резания t должна находиться в пределах 0,015–0,020 мм/дв.ход. В этом случае происходит менее нагруженный напряжениями процесс резания с полноценным стружкообразованием. Полученные результаты моделирования можно применять для дальнейшего прогнозирования, например, качества обработанной поверхности путем подбора технологических режимов обработки, на которых происходит активация процесса самозаточивания алмазных зерен.

Ключевые слова: моделирование; компьютерная визуализация; Ansys; комбинированная электроалмазная обработка; алмазное зерно; Р6М5; растравленный слой.

Modeling the structure of an etched layer in combined electric diamond grinding in the Ansys system

N.O. Malyshev^{1а}, V.Yu. Popov^{1б}, A.S. Yanyushkin^{2с}, S.Yu. Zvyadintseva^{1д}, A.N. Khlystov^{1е}

¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

² Chuvash State University; 15, Moskovsky Ave., Cheboksary, Republic of Chuvashia

^а pokosnik135@gmail.com, ^б slapopov@gmail.com, ^с yanyushkinas@mail.ru,

^д klyovo1@mail.ru, ^е alexey.khlystov@gmail.com

^а <https://orcid.org/0000-0003-2489-1170>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-6299-9161>, ^с <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>,

^д <https://orcid.org/0000-0002-6076-9765>, ^е <https://orcid.org/0000-0003-3017-9788>

Received 12.04.2024, accepted 17.05.2024

The development of artificial intelligence in almost all areas of human intellectual activity involves the expansion of engineering analysis tools, as well as an increase in the growth rate of software in the field of mechanical engineering. The main advantage of this will be the reduction in economic costs for the development of engineering products, their physical testing and the rejection of physical prototypes. This article presents the results of modeling the etched layer of the surface of high-speed steel R6M5 as a result of the influence of electrical factors of the cutting process and electrolyte on it. Contacting surfaces have been created: a model of diamond grain, as an element of a diamond grinding wheel, and a model of the machined surface of high-speed steel R6M5, as an element of a metal-

cutting tool. To solve the problem of contact interaction during combined electric diamond grinding of two juvenile surfaces, the universal software system for finite element analysis Ansys Workbench is chosen. The main simulation of the cutting process is carried out at three cutting depths t : 0.01, 0.02 and 0.03 mm/d.stroke. The influence of two electrical processing factors on the model of the treated surface is figured on: straightening current density $i_{pr} = 0.25 \text{ A/cm}^2$, etching current density $i_{tr} = 6.25 \text{ A/cm}^2$ and the effect of the electrolyte. The results of a comparative analysis of the chemical composition of the front surface of high-speed inserts before and after electrochemical treatment are taken into account. It is concluded that the characteristics of the etched layer during combined electric diamond grinding decrease in their properties by approximately 10%, which causes the effect of surface etching. As a result of comprehensive research, the problem of selecting and modeling a structure that would imitate the mechanical properties of the material of the etched layer of the processed surface of high-speed steel during combined electric diamond grinding is solved. Simulation shows that the optimal cutting depth t should be in the range of 0.015–0.020 mm/d.stroke. In this case, a less stress-laden cutting process occurs with full chip formation. The obtained modeling results can be used to further predict, for example, the quality of the machined surface by selecting technological processing modes at which the process of self-sharpening of diamond grains is activated.

Keywords: modeling; computer simulation; Ansys; Combined Electric Diamond Grinding; diamond grain; HSS; etched layer.

Введение. Появление в 2023 г. искусственного интеллекта (*ChatGPT* — генерация текста, *Midjourney* — генерация изображения, *Runway* — генерация видео) и его стремительное совершенствование практически во всех сферах человеческой интеллектуальной деятельности предполагают расширение «компьютерной линейки» инструментов инженерного анализа. Ожидается [1], что в области машиностроения, моделирования процессов резания материалов увеличится темп роста программного обеспечения. Главные преимущества, которые в результате этого получают частный бизнес и многие отрасли промышленности, это сокращение экономических затрат на разработку машиностроительной продукции, ее физические испытания и отбраковку физических прототипов.

Несмотря на введенные против России санкции, промышленность находит пути для использования в своих исследованиях актуальных систем автоматизированного проектирования, включая программное обеспечение для инженерного анализа. Ранее мы реализовали [2–4] некоторые из таких возможностей в области моделирования технологических процессов шлифования и комбинированной электроалмазной обработки (КЭАО). Осуществлялось статическое и динамическое моделирование в нескольких средах трехмерного моделирования — *Blender*, *Autodesk 3ds Max*, *SolidWorks*, в веб-среде [5].

Целью данной работы является методика моделирования растравленного слоя поверхности быстрорежущей стали Р6М5 в результате воздействия на нее электрических факторов процесса резания и электролита. При этом контактирующими при КЭАО поверхностями являются модель алмазного зерна как элемента алмазного шлифовального круга и модель обрабатываемой поверхности быстрорежущей стали Р6М5 как элемента металлорежущего инструмента.

Методика моделирования в системе Ansys. Моделированию процессов резания металлов при электроалмазном шлифовании посвящены работы А.С. Янюшкина, А.И. Грабченко, В.А. Федоровича [6; 7], а также ряда зарубежных ученых — О.А. Olufayo, К. Abou-El-Hosseini, С.Т. Woodin [8; 9]. Часть их исследований проведена в интересующей нас области визуализации результатов моделирования по методу конечных элементов.

Для решения задачи контактного взаимодействия при электроалмазном шлифовании двух ювенильных поверхностей была выбрана универсальная программная система конечно-элементного анализа *Ansys Workbench*. Она довольно популярна у специалистов в сфере решения задач механики деформируемого твердого тела. *Ansys* позволяет выполнять моделирование методом конечных элементов, т. е. математические представлять физическую систему, состоящую из детали или узла, свойств материала и граничных условий. Для нас ее плюсом является совместимость с теми САД-системами, в которых производились предварительные расчеты. Также отметим ее интерфейс, продуманный с учетом удобства пользователя, который упрощает создание конечных элементов и позволяет провести быструю оценку полученного результата с мгновенным выводом графической информации, т. е. быстрой визуализацией результата моделирования.

Режимы резания и условия обработки. Ранее [10], на первом этапе исследования модели взаимодействия мы определили состав и диапазон механических режимов резания при КЭАО, которые остались прежними: скорость резания $V = 35 \text{ м/с}$ и продольная подача $S = 1,5 \text{ м/мин}$. В данной работе основное моделирование процесса резания было проведено на трех величинах глубины резания t : 0,01; 0,02 и 0,03 мм/дв.ход. Также мы учли влияние на модель обрабатываемой поверхности двух электрических факторов КЭАО: плотность тока правки $i_{пр} = 0,25 \text{ А/см}^2$, плотность тока растравливания $i_{тр} = 6,25 \text{ А/см}^2$ и воздействие электролита. Полученные результаты не противоречат исследованиям ряда других авторов при аналогичном моделировании [11–14] и дополняют их.

Структура поверхностей. При моделировании структуры тела алмазного зерна и быстрорежущей стали значения механических свойств были оставлены прежними [10]. Приняв во внимание результаты [15] сравнительного анализа химического состава передней поверхности быстрорежущих пластин до и после электрохимической обработки, был сделан вывод, что характеристики растравленного слоя во время КЭАО уменьшаются в своих свойствах примерно на 10 %. Отсюда и возникает эффект растравливания. Данные о структуре этого растравленного слоя быстрорежущей стали были взяты из стандартов встроенной в систему *Ansys* базы данных (см. рис. 1).

Моделирование алмазного зерна. Поскольку вариативность форм алмазных зерен в шлифовальном круге весьма велика, для примера подходит практически любое зерно, взятое с полученных в поперечном разрезе SEM-фотографий поверхности круга AC6 80/63 MO13 100 % (см. рис. 2).

Напомним, что связка круга делается невидимой, потому что она не принимает участие в расчетах контактного взаимодействия. Также это позволяет удобнее визуализировать результаты моделирующего эксперимента. Назначаем тип сетки *Tetrahedrons* = 0,15. Это позволяет автоматически создавать сетку для моделирования любой геометрии, включая сложные и нестандартные формы, имитируя многоугольные формы и множество углов резания у режущих граней алмаза. Задаем моделям алмазных зерен параметр *Velocity* = 35 м/с, что соответствует рациональной скорости вращения шлифовального круга при КЭАО [10; 15].

Density	8,20E-06 kg/mm ³
Structural	
Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2,00E+05 MPa
Poisson's Ratio	0,33
Bulk Modulus	1,96E+05 MPa
Shear Modulus	75188 MPa
Johnson Cook Strength	
Strain Rate Correction	First-Order
Initial Yield Stress	824,5 MPa
Hardening Constant	350,2 MPa
Hardening Exponent	0,969
Strain Rate Constant	0,001
Thermal Softening Exponent	1
Melting Temperature	1320 °C

Рис. 1. Данные о стандартах из системы *Ansys* для моделирования структуры растравленного слоя быстрорежущей стали

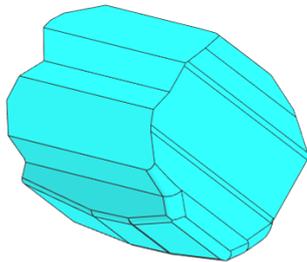


Рис. 2. 3D-модель алмазного зерна

Моделирование обрабатываемой поверхности. При отрисовке общего вида модели пластины быстрорежущей стали она была разделена на две части. Особенностью данной части работы является назначение для каждой части своей сетки:

- модель верхней, растравленной части материала сделана в виде квадратной сетки *Hex Dominant* = 0,0045 мм;
- модель нижней, основной части материала выполнена в виде сетки с размером 0,1 мм.

Во-первых, это сделано с целью оптимизации процесса расчета по методу конечных элементов для двух опытов: с глубиной резания $t = 0,01$ и $0,02$ мм/дв.ход. При резании на этих режимах напряжения не передаются на нерастравленную часть материала, что дает возможность уменьшить шаг сетки для оптимизации расчетов.

Во-вторых, для $t = 0,03$ мм/дв.ход сетка уже с шагом 0,0045 мм, так как при резании глубина срезаемого слоя равна толщине растравленного слоя, и, соответственно, напряжения, возникающие при резании, не влияют значительно на нерастравленный слой.

В-третьих, это сделано для получения более качественной визуализации результатов.

Моделирование динамической сцены. Модель обрабатываемой поверхности статически закреплена функцией *Fixed Support*, что имитирует магнитный стол шлифовального станка. Модель алмазного зерна перемещается функцией *Velocity* = 35 м/с, что имитирует скорость вращения шлифовального круга. Для имитации различной глубины резания задавались три величины проникновения модели зерна в модель обрабатываемой поверхности согласно реальной глубине резания t : 0,01; 0,02 и 0,03 мм/дв.ход.

Результаты и обсуждение. Известны исследования по прогнозированию ряда процессов, протекающих при шлифовании: величины механического износа абразивных зерен [16], остаточных напряжений [17; 18] и температуры [19; 20]. Сравнивая аналогичные параметры экспериментальных наблюдений контактного взаимодействия, полученные другими исследователями, отметим их хорошее согласие.

На рис. 3–5 представлены результаты визуализации расчетов контактного взаимодействия с видами на динамические сцены различных физических моделей.

При глубине резания $t = 0,01$ мм/дв.ход (см. рис. 3) в основном происходит процесс выглаживания, без образования стружки. Поверхностный слой больше вдавливается алмазным зерном вглубь материала и раздвигается по его бокам, чем срезается. Глубина резания довольно мала для полноценного взаимодействия зерна с обрабатываемой заготовкой. Конечно, это в большей степени зависит от конфигурации режущей кромки зерна.

Также интересен, тот факт, что при начале взаимодействия такой модели режущей кромки с моделью обрабатываемой поверхности (см. рис. 3, ж), материал начинает выдавливаться по ходу движения зерна (см. рис. 3, л). Но из-за того, что материал снизу и по бокам зерна уже упрочнился, выдавливание вперед из-за высокого сопротивления материала становится невозможным. Это хорошо видно по волне напряжений (см. рис. 3, з). Нижний упрочненный слой начинает выдавливаться в сторону начала движения зерна. Предполагаем, что это происходит за счет действия электрохимических процессов, которые разупрочняют поверхность стали Р6М5. Также можно предположить, что данный эффект происходит из-за образующихся на алмазном зерне небольших фасок, скруглений в процессе резания. Другими словами, это результат проявления эффекта самозатачивания алмазных зерен, который активируется

при воздействии электрических факторов КЭАО — в данном случае плотности тока правки.

При глубине резания $t = 0,02$ мм/дв.ход начинается процесс полноценного стружкообразования (см. рис. 4, б). Если судить по напряжениям в начале взаимодействия зерна с поверхностью (см. рис. 4, а) и в середине движения (см. рис. 4, д), то можно сделать вывод, что при имеющемся процессе стружкообразования разница максимальных напряжений $\approx 4\%$. Далее, если сравнивать напряжения при глубине резания $t = 0,01$ мм/дв.ход с напряжениями при глубине резания $t = 0,02$ мм/дв.ход, то разница между ними, при тех же условиях времени эксперимента, будет $\approx 20\%$.

При глубине резания $t = 0,03$ мм/дв.ход можно заметить начало процесса засаливания режущей поверхности алмазного круга. Об этом сигнализируют возрастающие напряжения, с 6 618 до 9 223 МПа (см. рис. 5, а–в). Из-за того, что глубина резания здесь практически равна расстоянию до связки круга, образующаяся стружка тут же в нее упирается. Также

можно заметить, как по материалу распространяется волна напряжений, сигнализирующая о том, что срезанному материалу некуда выходить.

Выводы и заключение. Для моделирования в системе *Ansys* структуры растравленного слоя при КЭАО нами предложены некоторые рекомендации.

1. В результате комплексных исследований, выполненных авторами и представленных в настоящей работе, была решена задача выбора и моделирования такой структуры, которая имитировала бы механические свойства материала растравленного слоя обрабатываемой поверхности быстрорежущей стали при КЭАО. Эта часть работы включала:

- создание моделей путем конечно-элементного анализа и их настройку с заданием соответствующих свойств;
- размещение моделей на сцене;
- процесс расчета напряжений при резании и выводе результатов с рендером изображения.

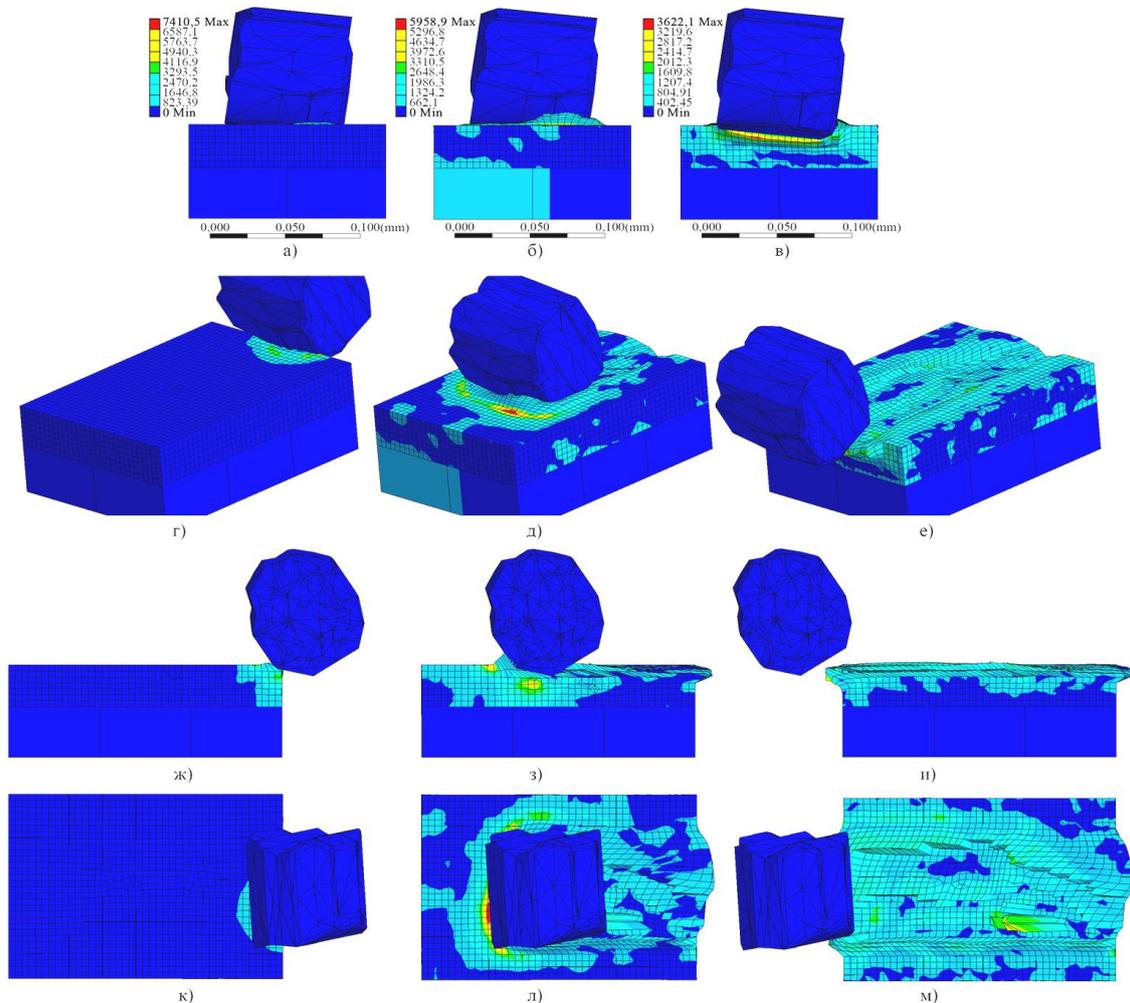


Рис. 3. Виды на динамическую сцену физической модели с $t = 0,01$ мм/дв.ход: а — спереди, начало движения; б — спереди, середина движения; в — спереди, конец движения; г — общий вид, начало движения; д — общий вид, середина движения; е — общий вид, конец движения; ж — в разрезе, начало движения; з — в разрезе, середина движения; и — в разрезе, конец движения; к — сверху, начало движения; л — сверху, середина движения; м — сверху, конец движения

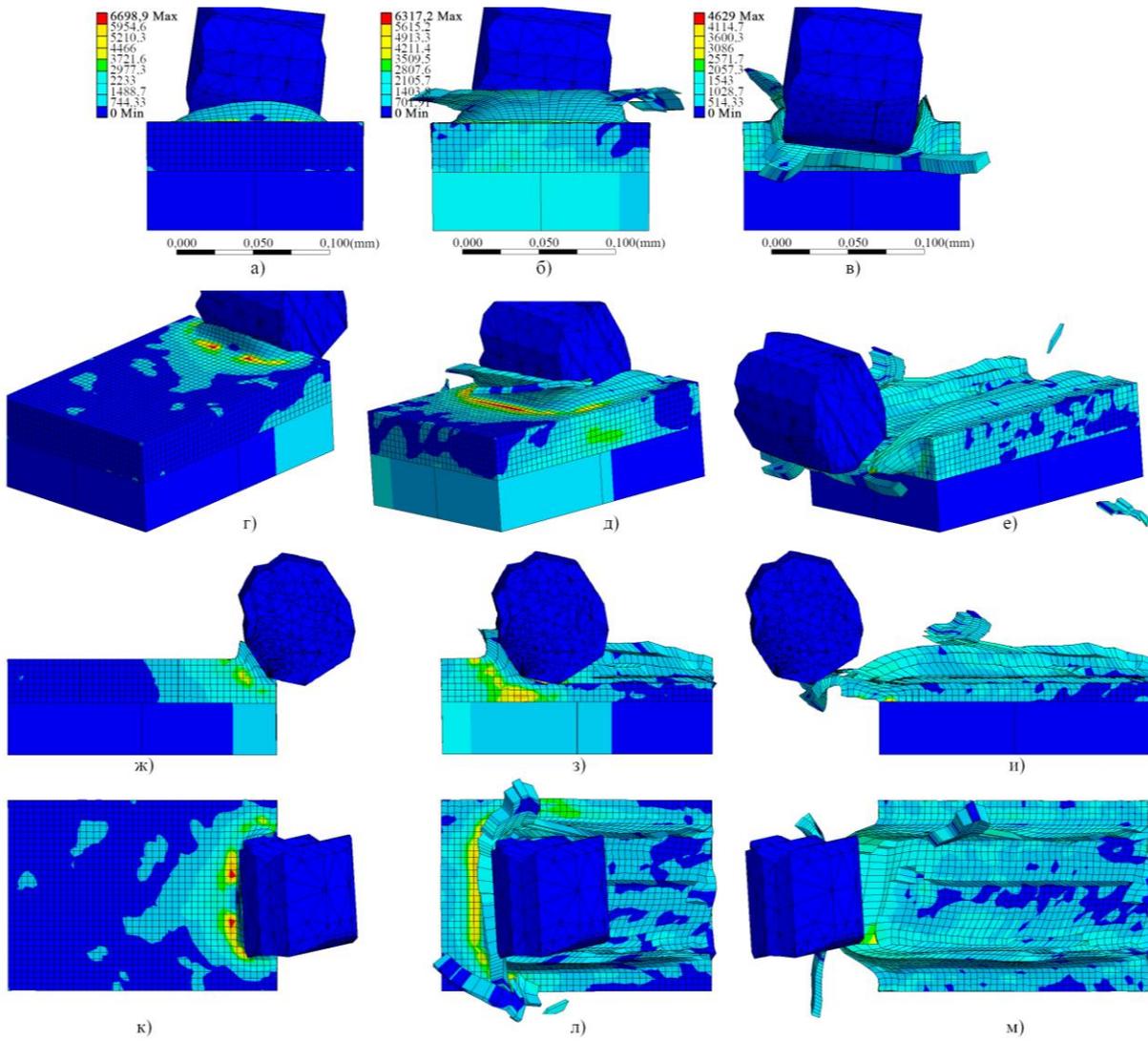
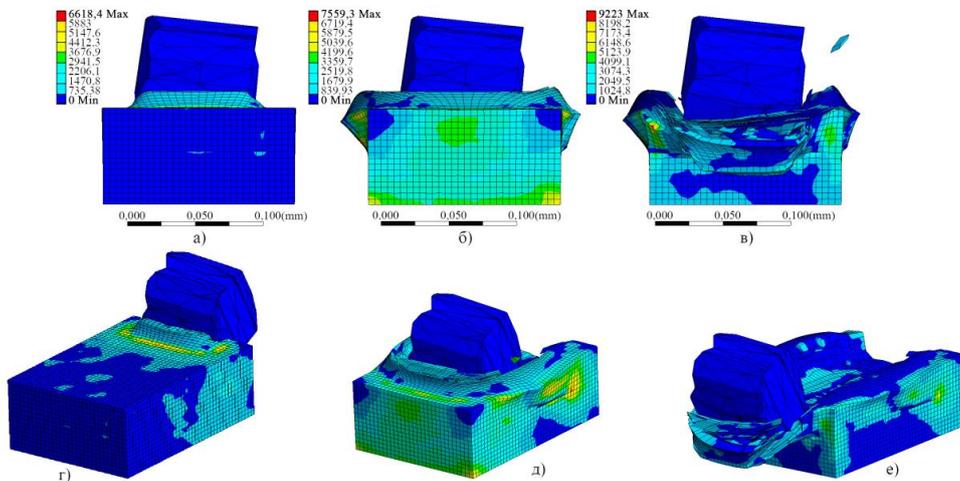


Рис. 4. Виды на динамическую сцену физической модели с $t = 0,02$ мм/дв.ход: *а* — спереди, начало движения; *б* — спереди, середина движения; *в* — спереди, конец движения; *г* — общий вид, начало движения; *д* — общий вид, середина движения; *е* — общий вид, конец движения; *ж* — в разрезе, начало движения; *з* — в разрезе, середина движения; *и* — в разрезе, конец движения; *к* — сверху, начало движения; *л* — сверху, середина движения; *м* — сверху, конец движения



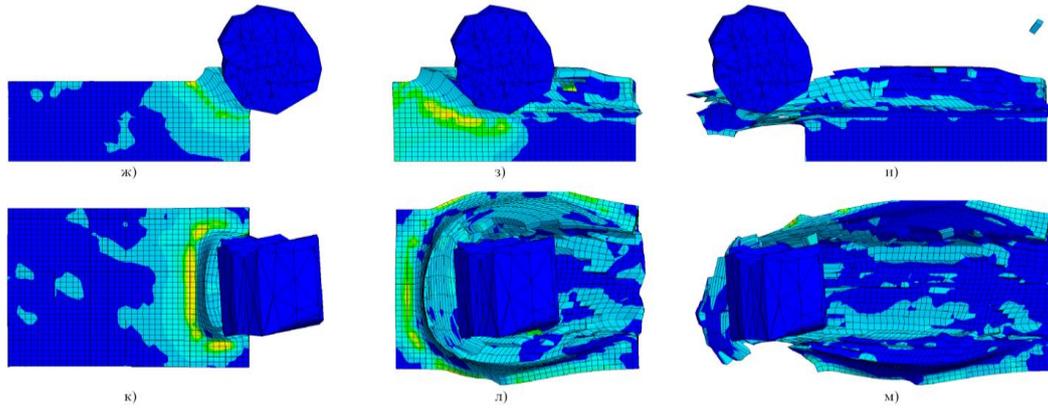


Рис. 5. Виды на динамическую сцену физической модели с $t = 0,03$ мм/дв.ход: *a* — спереди, начало движения; *b* — спереди, середина движения; *c* — спереди, конец движения; *z* — общий вид, начало движения; *d* — общий вид, середина движения; *e* — общий вид, конец движения; *ж* — в разрезе, начало движения; *з* — в разрезе, середина движения; *и* — в разрезе, конец движения; *к* — сверху, начало движения; *л* — сверху, середина движения; *м* — сверху, конец движения

2. Для проверки адекватности моделирования проводилось сравнение профилей, полученных после КЭАО и конечно-элементного моделирования. Сравнение показало достаточно хорошее совпадение параметров поверхностей.

3. Моделирование показывает, что оптимальная глубина резания t должна находиться в пределах 0,015–0,020 мм/дв.ход. В этом случае происходит менее нагруженный напряжениями процесс резания с полноценным стружкообразованием. Так моделирующий эксперимент может помочь в назначении режимов резания при разработке новых технологий резания современных материалов.

Литература

1. О внесении изменений в Указ Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» и в Национальную стратегию, утвержденную этим Указом: указ Президента РФ от 15.02.2024 № 124. М., 2024. 40 с.
2. Popov V.Y., Yanyushkin A.S. Adhesion-diffusion interaction of contact surfaces with the treatment diamond grinding wheels // *Eastern European Scientific Journal*. 2014. № 2. P. 301-310.
3. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Атомная визуализация алмазного резания // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2016. Т. 8, № 1. С. 161-172.
4. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Дефекты в алмазах - основа адгезии при шлифовании // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2017. № 5 (74). С. 16-23.
5. Хлыстов А.Н., Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Архипов П.В. Физическое моделирование решёток Браве в веб-среде // *Системы. Методы. Технологии*. 2021. № 2 (50). С. 51-56.
6. Янюшкин А.С., Секлетина Л.С., Гартфельдер В.А., Лобанов Д.В. Модель и расчет энергии адгезии контактного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов // *Вестн. Иркутского гос. технического ун-та*. 2018. Т. 22, № 12 (143). С. 125-134.
7. Грабченко А.И., Федорович В.А. 3D процессы алмазноабразивной обработки: моногр. Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. 345 с.

4. Результаты динамического моделирования в виде полученных напряжений показали параметры, которые находятся в хорошем согласии с экспериментальными наблюдениями, полученными как авторами работы, так и другими исследователями.

5. Полученные результаты моделирования можно применять для дальнейшего прогнозирования, например, качества обработанной поверхности путем подбора технологических режимов обработки, на которых происходит активация процесса самозатачивания алмазных зерен.

8. Olufayo O.A., Abou-El-Hossein K. Molecular dynamics modeling of nanoscale machining of silicon // *Procedia CIRP*. 2013. № 8. P. 504-509.
9. Woodin C.T. Effects of dressing parameters on grinding wheel surface topography // *Georgia Institute of Technology: Materials Science*, 2014. 164 p.
10. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Малышев Н.О., Медведева О.И., Звядинцева С.Ю. Моделирование в системе Ansys контактирующих поверхностей при шлифовании // *Системы. Методы. Технологии*. 2022. № 1 (53). С. 30-35.
11. Kumar S., Choudhury S.K. Prediction of Wear and Surface Roughness in Electro-Discharge Diamond Grinding // *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. V. 191. P. 206-209.
12. Jiang J.L., Ge P.Q., Bi W.B., Zhang L., Wang D.X., Zhang Y. 2D/3D Ground Surface Topography Modeling Considering Dressing and Wear Effects in Grinding Process // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2013. V. 74. P. 29-40.
13. Fathima K., Senthil Kumar A., Rahman M., Lim H.S. A Study on Wear Mechanism and Wear Reduction Strategies in Grinding Wheels Used for ELID Grinding // *Wear*. 2003. V. 254. P. 1247-1255.
14. Shmidt I.V., Dyakonov A.A. Modeling of Stressed State During the Processing of Laminated Surfaces // *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*. 2014. International Association of Engineers (IAENG). P. 914-917.
15. Попов В.Ю., Рычков Д.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Лосев Е.Д., Селин Н.В. Исследование качества поверхности инструмента из быстрорежущей стали после комбинированной электроалмазной обработки //

Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2019. Т. 21, № 1. С. 6-15.

16. Ардашев Д.В. Определение величины механического износа абразивных зерен при шлифовании // Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та. Сер. Машиностроение. 2014. Т. 14, № 4. С. 55-66.
17. Иванова Т.Н. Физическая сущность деформаций деталей под действием остаточных напряжений при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2008. № 2 (39). С. 28-31.
18. Зубаирова Л.Х., Свиршев В.И. Определение остаточных напряжений от действия силы резания при шлифовании // СТИН. 2014. № 2. С. 35-37.
19. Левченко Е.А., Саса Д.А. Исследование тепловых явлений при абразивной обработке // Вестн. современных технологий. 2020. № 4 (20). С. 36-40.
20. Волков Д.И., Цветков Е.В., Цветков Б.В. Моделирование тепловых процессов при алмазном глубинном шлифовании монолитного твердосплавного инструмента // Вестн. Уфимского гос. авиационного технического ун-та. 2013. Т. 17, № 8 (61). С. 123-129.
8. Olufayo O.A., Abou-El-Hossein K. Molecular dynamics modeling of nanoscale machining of silicon // Procedia CIRP. 2013. № 8. P. 504-509.
9. Woodin C.T. Effects of dressing parameters on grinding wheel surface topography // Georgia Institute of Technology: Materials Science, 2014. 164 p.
10. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Malyshev N.O., Medvedeva O.I., Zvyadinceva S.Yu. Ansys modeling of contact surfaces for grinding // Systems. Methods. Technologies. 2022. № 1 (53). P. 30-35.
11. Kumar S., Choudhury S.K. Prediction of Wear and Surface Roughness in Electro-Discharge Diamond Grinding // Journal of Materials Processing Technology. 2007. V. 191. P. 206-209.
12. Jiang J.L., Ge P.Q., Bi W.B., Zhang L., Wang D.X., Zhang Y. 2D/3D Ground Surface Topography Modeling Considering Dressing and Wear Effects in Grinding Process // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2013. V. 74. P. 29-40.
13. Fathima K., Senthil Kumar A., Rahman M., Lim H.S. A Study on Wear Mechanism and Wear Reduction Strategies in Grinding Wheels Used for ELID Grinding // Wear. 2003. V. 254. P. 1247-1255.
14. Shmidt I.V., Dyakonov A.A. Modeling of Stressed State During the Processing of Laminated Surfaces // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science. 2014. International Association of Engineers (IAENG). P. 914-917.
15. Popov V.Yu., Rychkov D.A., Arhipov P.V., Kuznecov A.M., Losev E.D., Selin N.V. The Study of the Surface Quality of High-Speed Steel Tool after the Combined Electric Diamond Grinding // Обработка Металлов (Metal Working and Material Science). 2019. V. 21, № 1. P. 6-15.
16. Ardashev D.V. Definition of mechanical wear of abrasive grains at grinding // Bulletin of South Ural State University. Ser. Mechanical engineering industry. 2014. V. 14, № 4. P. 55-66.
17. Ivanova T.N. The physical essence of deformations of parts under the action of residual stresses during grinding // Обработка Металлов (Metal Working and Material Science). 2008. № 2 (39). P. 28-31.
18. Zubairova L.H., Svirshchev V.I. Determination of residual stresses from the action of cutting force during grinding // Russian Engineering Research. 2014. № 2. P. 35-37.
19. Levchenko E.A., Sasa D.A. Study of thermal phenomena during abrasive processing // Journal of modern technologies. 2020. № 4 (20). P. 36-40.
20. Volkov D.I., Cvetkov E.V., Cvetkov B.V. Thermal processes modeling of a diamond deep grinding of a spiral lead of the monolithic carbide material cutting tools // Vestnik UGATU. 2013. V. 17, № 8 (61). P. 123-129.

References

1. О внесении изменений в Указ Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 г. № 490 « On the development of artificial intelligence in the Russian Federation" i v Nacional'nyu strategiyu, utverzhennuyu etim Ukazom: ukaz Prezidenta RF ot 15.02.2024 № 124. М., 2024. 40 p.
2. Popov V.Y., Yanyushkin A.S. Adhesion-diffusion interaction of contact surfaces with the treatment diamond grinding wheels // Eastern European Scientific Journal. 2014. № 2. P. 301-310.
3. Popov V.Yu., Hlystov A.N., Bondin A.V. Atomic visualization of diamond cutting // Computer Research and Modeling. 2016. V. 8, № 1. P. 161-172.
4. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Hlystov A.N. On the destruction of diamond grains during grinding // Обработка Металлов (Metal Working and Material Science). 2017. № 5 (74). P. 16-23.
5. Hlystov A.N., Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Arhipov P.V. Physical modeling of Bravais lattices in a web environment // Systems. Methods. Technologies. 2021. № 2 (50). P. 51-56.
6. Yanyushkin A.S., Sekletina L.S., Gartfel'der V.A., Lobanov D.V. Model and calculation of adhesion energy of tool and processed material contact interaction // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2018. V. 22, № 12 (143). P. 125-134.
7. Grabchenko A.I., Fedorovich V.A. 3D processes of diamond abrasive processing: monogr. Har'kov: NTU «HPI», 2008. 345 p.