

Моделирование в системе Ansys контактирующих поверхностей при шлифовании

В.Ю. Попов^{1a}, А.С. Янышкин^{2b}, Н.О. Малышев^{1c}, О.И. Медведева^{1d}, С.Ю. Звядинцева^{1e}

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

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

^a slapopov@gmail.com, ^b yanyushkinas@mail.ru, ^c pokosnik135@gmail.com, ^d m.olgaiv@yandex.ru, ^e klyovo1@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-6299-9161>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-2489-1170>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-3535-2976>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-6076-9765>

Статья поступила 20.01.2022, принята 20.01.2022

Сегодня от машиностроения требуется создание различных деталей, изделий и 3D-моделей с учетом многих количественных параметров. Поэтому современное компьютерное моделирование технологических процессов направлено на разработку объемных и качественных моделей. Эти параметры в дальнейшем определяют стоимостные характеристики современных технических проектов, в которых важным элементом является проведение виртуального эксперимента. В данной статье представлены результаты такого виртуального эксперимента по моделированию контактирующих поверхностей при комбинированной электроалмазной обработке. Разработана методика моделирования контактирующих при шлифовании двух обрабатываемой поверхности быстрорежущей стали Р6М5 как элемента алмазного шлифовального круга и модели обрабатываемой поверхности аналога быстрорежущей стали со значениями механических свойств, выбираемых из базы системы Ansys. На первом этапе моделирования по методу конечных элементов разрабатывалась структура контактирующих поверхностей, имитирующая режущую поверхность алмазного чашечного круга на металлической связке марки АС6 80/63 МО13 100% с размером моделей зерен от 80 до 63 мкм и поверхность, имитирующая обрабатываемую поверхность аналога быстрорежущей стали со значениями механических свойств, выбираемых из базы системы Ansys. На втором этапе путем моделирования динамической сцены создана визуализация процесса резания единичным алмазным зерном в четырех разных положениях. В качестве режимов резания и условий обработки, имитирующих основные режимы резания при комбинированной электроалмазной обработке, назначались скорость резания в диапазоне $V = 17-51$ м/с и глубина резания в диапазоне $t = 0,01-0,03$ мм/дв.ход. В результате расчетов получены модели шлифовальных рисок от разной глубины, разной скорости и разных углов резания. Для последующего анализа получены предварительные данные о распределении напряжений в модели обрабатываемой поверхности. Предложены некоторые рекомендации для физического моделирования в системе Ansys контактирующих поверхностей при шлифовании, которые могут служить основой для разработки методик моделирования процессов резания любых новых материалов, включая сверхтвердые и функциональные наноматериалы.

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

Ansys modeling of contact surfaces for grinding

V.Yu. Popov^{1a}, A.S. Yanyushkin^{2b}, N.O. Malyshev^{1c}, O.I. Medvedeva^{1d}, S.Yu. Zvyadintseva^{1e}

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

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

^a slapopov@gmail.com, ^b yanyushkinas@mail.ru, ^c pokosnik135@gmail.com, ^d m.olgaiv@yandex.ru, ^e klyovo1@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-6299-9161>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-2489-1170>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-3535-2976>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-6076-9765>

Received 20.01.2022, accepted 20.01.2022

Today, mechanical engineering is required to create various parts, products and 3D-models, taking into account many quantitative parameters. Therefore, modern computer modeling of technological processes is aimed at the development of volumetric and high-quality models. These parameters further determine the cost characteristics of modern technical projects, in which an important element is the conduct of a virtual experiment. This article presents the results of such a virtual experiment on modeling contact surfaces in combined electric diamond machining. A technique has been developed for modeling two surfaces in contact during grinding: a model of the cutting surface of a diamond grain, as an element of a diamond grinding wheel, and a model of the machined surface of HSS, as an element of a metal-cutting tool. To solve the problems of contact interaction during grinding of two juvenile surfaces, the Ansys universal software system for finite element analysis is chosen. At the first stage of modeling by the finite element method, the structure of the contact surfaces is developed, imitating the cutting surface of a diamond cup wheel on a metal bond grade АС6 80/63 МО13 100%, with a grain size of 80 to 63 microns and a surface imitating the machined surface of an analogue of HSS with values of mechanical properties selected from the base of the Ansys system. At the second stage, by modeling a dynamic scene, a visualization of the cutting process with a single diamond grain in four different positions is created. As cutting modes and processing conditions that simulate the main cutting modes in

combined electric diamond machining, a cutting speed in the range $V = 17-51$ m/s and a depth of cut in the range $t = 0,01-0,03$ mm/d.stroke are assigned. As a result of the calculations, models of grinding marks from different depths, different speeds and different cutting angles are obtained. For subsequent analysis, preliminary data on the distribution of stresses in the model of the machined surface are obtained. Some recommendations for physical modeling in the Ansys system of contact surfaces during grinding are proposed, which can serve as a basis for developing methods for modeling cutting processes of any new materials, including superhard and functional nanomaterials.

Keywords: modeling; computer simulation; Ansys; combined electric diamond grinding; diamond grain; HSS.

Введение. На сегодняшний день компьютерное моделирование технологических процессов в машиностроении направлено на разработку объемных и качественных моделей. При этом для последующего создания из них различных деталей, изделий или 3D-моделей необходимо учитывать многие количественные параметры. Ранее мы упоминали [1–4] о реализации таких возможностей моделирования применительно к области технологических процессов, как обычного шлифования, так и комбинированной электроалмазной обработки (КЭАО). Было рассмотрено статическое и динамическое моделирование в таких средах трехмерного моделирования, как *Blender*, *Autodesk*, *3Ds Max*, *SolidWorks*, а также в наиболее доступной пользователю веб-среде [5].

Решение аналогичных задач предсказательного моделирования механических свойств, например, в области материаловедения, позволяет разрабатывать любые новые материалы, включая сверхтвердые и функциональные наноматериалы [6]. Поэтому решение вопросов их последующей механической обработки, например, шлифованием, а в особенности, если эти материалы сверхтвердые и высокопрочные, еще долгое время будет весьма актуально. Сегодня моделирование процессов их резания все чаще находит отражение в компьютерной 3D-графике, т. е. с визуализацией обработки поверхностей [7].

Целью данной работы является методика моделирования контактирующих при шлифовании двух поверхностей: модели поверхности алмазного зерна как элемента алмазного шлифовального круга и модели обрабатываемой поверхности быстрорежущей стали Р6М5 как элемента металлорежущего инструмента.

Методика моделирования в системе Ansys. Для решения задач контактного взаимодействия при шлифовании двух ювенильных поверхностей была выбрана универсальная программная система конечно-элементного анализа *Ansys*. Она совместима с САД-системами, в которых ранее производились предварительные расчеты, например, в *SolidWorks*. Также отметим ее интерактивный режим работы, упрощающий процедуру создания конечно-элементной модели и оценку полученного результата с мгновенным выводом графической информации.

Вопросам моделирования по методу конечных элементов и визуализации процессов резания при шлифовании алмазным зерном посвящены работы А.С. Янюшкина, А.И. Грабченко, В.А. Федоровича [8; 9], а также ряда зарубежных ученых — С.Т. Woodin, О.А. Olufayo, К. Abou-El-Hosseini [10; 11].

Режимы резания и условия обработки. Технология КЭАО используется нами в производстве достаточное время, чтобы выделить влияющие на качество обработки факторы. Это плотность тока правки ($i_{пр} = 0,083-0,332$ А/см²), плотность тока растравливания ($i_{тр} = 3,125-9,375$ А/см²), скорость резания ($V = 17-51$ м/с), глубина резания ($t = 0,01-0,03$ мм/дв.ход) и продольная подача ($S = 0,5-2$ м/мин). Для первого этапа разработки модели контактного взаимодействия достаточно учитывать такие факторы, как V , t , S . После проверки модели адекватности экспериментальным данным будут учитываться электрические факторы КЭАО, а также воздействие на обрабатываемую поверхность стандартного электролита. Некоторыми авторами предпосылки к моделированию таких экспериментов уже сделаны [12–15].

Структура поверхностей. Для моделирования структуры алмазного зерна и быстрорежущей стали выбирались значения механических свойств данных материалов из стандартов встроенной в систему *Ansys* базы данных (см. рис. 1).

Моделирование алмазных зерен. Для обеспечения большей вариативности углов резания мы создали четыре модели зерен с разным расположением их в пространстве, т. е. закреплением внутри связки (см. рис. 2). Такая вариативность положений моделей зерен требуется для того, чтобы в результате увидеть их взаимодействие с обрабатываемой поверхностью в виде напряжений.

Поскольку в наших опытах применялся алмазный чашечный круг на металлической связке марки АС6 80/63 М013 100 %, то размеры моделей зерен варьировались от 80 до 63 мкм, что соответствует зернистости шлифовального круга 80/63. Для того, чтобы в реальности шлифование проходило в режиме самозатачивания, необходимо, чтобы размер выступающих из связки круга зерен составлял не менее трети от их размера, т. е. около 21–27 мкм. Это было соблюдено путем программного назначения «зажима», т. е. фиксации моделей зерна внутри модели связки круга на 66,7 %. Затем связка делалась невидимой, так как в расчетах контактного взаимодействия она участия не принимает. Другим плюсом является более удобная для анализа визуализация результатов.

Имитируя многоугольные формы и множество углов резания у режущих граней алмаза, система *Ansys* назначает тип сетки *Tetrahedrons/Triangles = 0,009*¹. Моделям алмазных зерен задавался параметр *Velocity*. Это соот-

¹ Здесь: чем меньше выбрать величину сетки, тем точнее будет расчет с результатами, но тогда повышаются требования к вычислительной мощности компьютера.

ветствует шлифпорошку из синтетических монокристаллических алмазов повышенной прочности марки АС6.

Алмаз

Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

Density 3,5e-06 kg/mm³

Structural

Isotropic Elasticity

Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	9,005e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,070000
Bulk Modulus	3,4903e+05 MPa
Shear Modulus	4,2079e+05 MPa

Other

Johnson Cook Strength

Strain Rate Correction	First-Order
Initial Yield Stress	1,35e+05 MPa
Hardening Constant	3,5897e+05 MPa
Hardening Exponent	6,1898
Strain Rate Constant	1e-05
Thermal Softening Exponent	0,64030
Melting Temperature	3700,0 °C
Reference Strain Rate (/sec)	1,0000

P6M5

Density 8,2e-06 kg/mm³

Structural

Isotropic Elasticity

Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2,2e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,33000
Bulk Modulus	2,1569e+05 MPa
Shear Modulus	82707 MPa

Other

Johnson Cook Strength

Strain Rate Correction	First-Order
Initial Yield Stress	970,00 MPa
Hardening Constant	412,40 MPa
Hardening Exponent	1,1400
Strain Rate Constant	0,00100000
Thermal Softening Exponent	1,0000
Melting Temperature	1320,0 °C
Reference Strain Rate (/sec)	1,0000

Рис. 1. Данные о стандартах из системы *Ansys* для моделирования структуры алмазного зерна и быстрорежущей стали

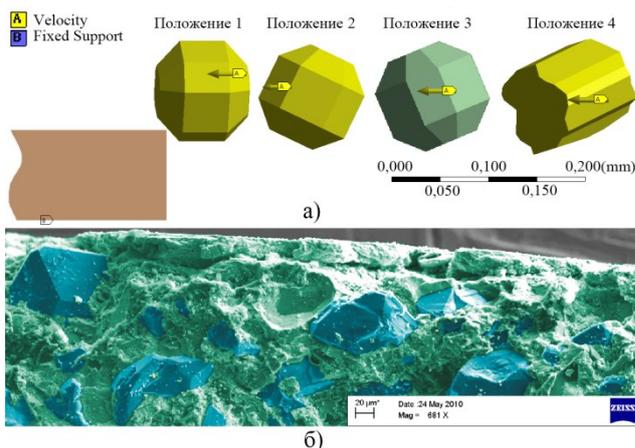


Рис. 2. Моделирование алмазных зерен в *Ansys* для исследования контактного взаимодействия при КЭАО: *a* — общий вид физических моделей четырех положений алмазных зерен и обрабатываемой поверхности; *б* — SEM-фотография поверхности шлифовального круга АС6 80/63 М013 100 % в поперечном разрезе с разнообразием внешнего вида алмазных зерен

Моделирование обрабатываемой поверхности. Для обеспечения и имитации статического, неподвижного закрепления быстрорежущей пластинки выбиралась функция магнитного стола из базы данных *Ansys*. При отрисовке общего вида модели поверхности назначалась квадратная сетка *Hex Dominant* = 0,008.

Отметим, что при создании начальной конфигурации контактирующих поверхностей не моделировались следующие факторы:

- параметры микрорельефа, так как на данном микроуровне моделирования и при ограниченном размере динамической сцены они не играют существенной роли. Ранее мы отмечали, что если модель обрабатываемой поверхности создать «идеальной», т. е. ровной, плоской, то это предоставляет исследователям дополнительные возможности для наблюдения изменений, возникающих при резании. Например, становится возможным одновременное наблюдение за изменениями (деформациями) в структуре исследуемой поверхности, возникающими при разной глубине резания алмазным зерном [1]. Данный подход реализован в настоящей статье;

- фазовый состав модели быстрорежущей стали, так как химический состав марки стали выбирается из систем, в расчетах которой он же и учитывается.

Моделирование динамической сцены. Как отмечалось выше, модель обрабатываемой поверхности статически неподвижна (*Fixed Support*), а модель алмазного зерна перемещается (*Velocity*). При моделировании динамической сцены, необходимой для дальнейшего изучения напряжений при резании, моделям зерен задавались три скорости движения согласно реальной скорости вращения шлифовального круга: $V = 17$ м/с, $V = 34$ м/с, $V = 51$ м/с. Для имитации различной глубины резания задавались три величины проникновения модели зерна в модель обрабатываемой поверхности согласно реальной глубине резания: $t = 0,01$ мм/дв.ход, $t = 0,02$ мм/дв.ход, $t = 0,03$ мм/дв.ход.

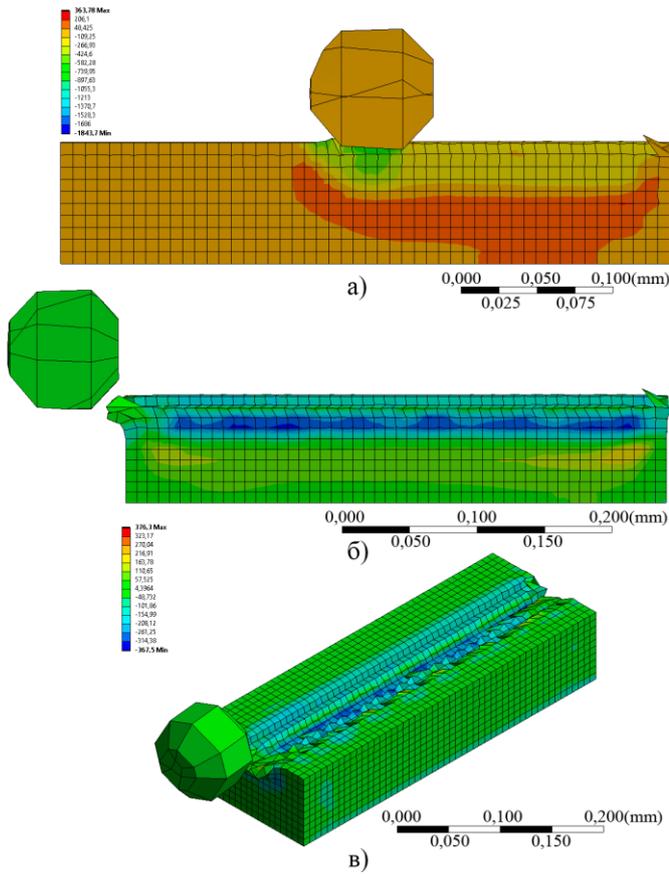


Рис. 3. Физическая модель с положением зерна 1, $V = 17$ м/с, $t = 0,01$ мм/дв.ход: *a* — вид на динамическую сцену в разрезе на середине движения; *б* — вид на динамическую сцену в разрезе в конце движения; *в* — общий вид на динамическую сцену

Результаты и обсуждение. Существует ряд работ по прогнозированию тепловых процессов при шлифовании [16; 17], остаточных напряжений [18; 19], величины механического износа абразивных зерен [20]. Сравнивая аналогичные параметры экспериментальных наблюдений контактного взаимодействия, полученные другими исследователями, отметим их хорошее согласие.

Так, на рис. 3–6 представлены результаты расчетов контактного взаимодействия четырех физических моделей резания с разным расположением зерен, а также имитирующих разные режимы резания при КЭАО: $V = 17–51$ м/с, $t = 0,01–0,03$ мм/дв.ход. Это позволило обеспечить вариативность и углов резания при шлифовании и основных режимов резания.

Полученные результаты можно применять для последующего прогнозирования как качества обработанной поверхности, так и самозатачивания алмазных зерен (см. рис. 7).

Реализация физической модели самозатачивания режущей поверхности алмазного зерна показала, что при определенных значениях технологических режимов обработки создаются условия, при которых шлифовальный круг работает с самозатачиванием, т. е. постоянное вскрытие и разрушение режущих кромок алмаза благоприятно сказывается на режущих свойствах круга [2].

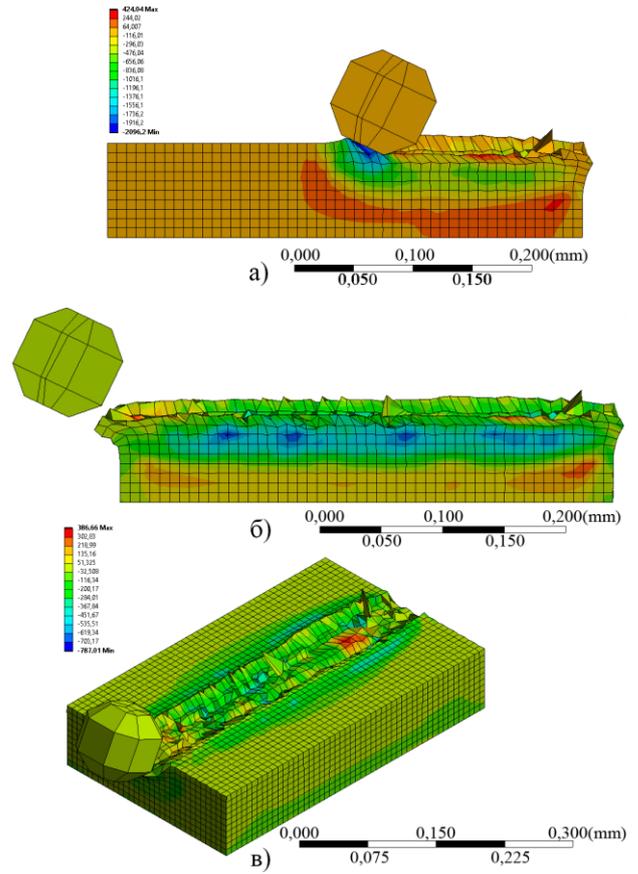


Рис. 4. Физическая модель с положением зерна 2, $V = 17$ м/с, $t = 0,01$ мм/дв.ход: *a* — вид на динамическую сцену в разрезе на середине движения; *б* — вид на динамическую сцену в разрезе в конце движения; *в* — общий вид на динамическую сцену

Выводы и заключение. Нами предложены некоторые рекомендации для моделирования в системе *Ansys* контактирующих поверхностей при шлифовании.

1. В результате исследований, выполненных авторами и представленных в настоящей работе, на основе сбора данных по созданию моделей двух контактирующих при электроалмазной обработке поверхностей — алмазных зерен и шлифуемого ими материала — была решена задача выбора начальной конфигурации моделируемой системы. 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.

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

3. Результаты динамического моделирования в виде предварительно полученных напряжений на статической модели обрабатываемой поверхности показали параметры, которые находятся в хорошем согласии с экспериментальными наблюдениями, полученными как авторами работы, так и другими исследователями.

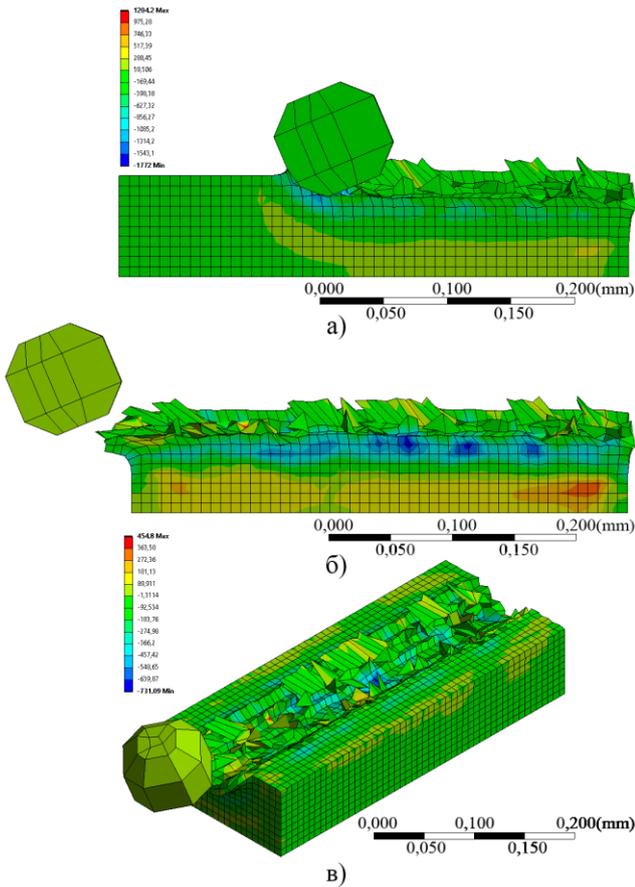


Рис. 5. Физическая модель с положением зерна 3, $V = 34$ м/с, $t = 0,02$ мм/дв.ход: *a* — вид на динамическую сцену в разрезе на середине движения; *б* — вид на динамическую сцену в разрезе в конце движения; *в* — общий вид на динамическую сцену

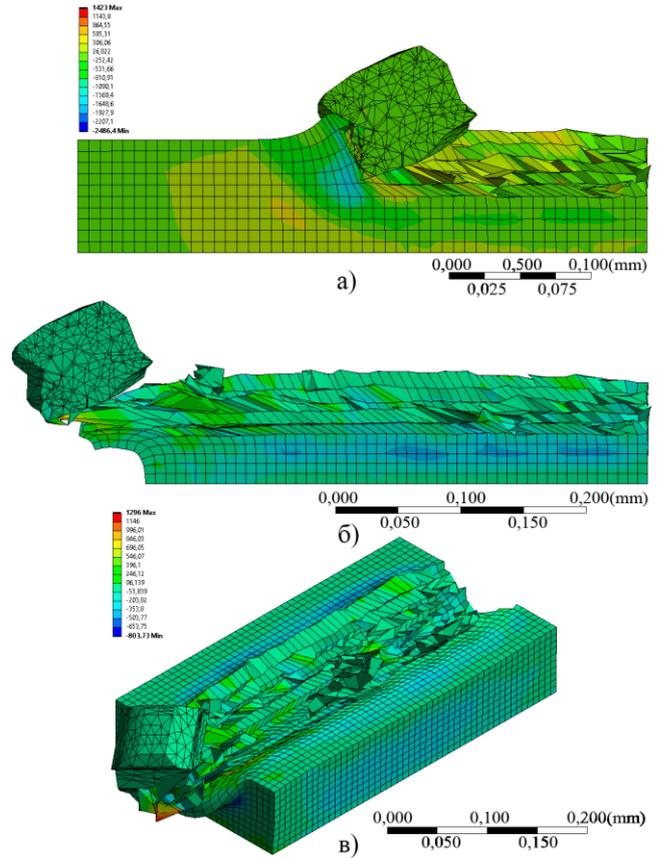


Рис. 6. Физическая модель с положением зерна 4, $V = 51$ м/с, $t = 0,03$ мм/дв.ход: *a* — вид на динамическую сцену в разрезе на середине движения; *б* — вид на динамическую сцену в разрезе в конце движения; *в* — общий вид на динамическую сцену

4. При дальнейшем развитии данный подход позволит установить степень влияния каждого из рассматриваемых факторов на реальный процесс шлифования и станет базой для определения не рациональ-

ных, а уже оптимальных режимов КЭАО. В свою очередь, это даст возможность назначать будущую область для экспериментов и интервалы варьирования факторов при моделировании процессов резания любых новых материалов, включая сверхтвердые и функциональные наноматериалы.

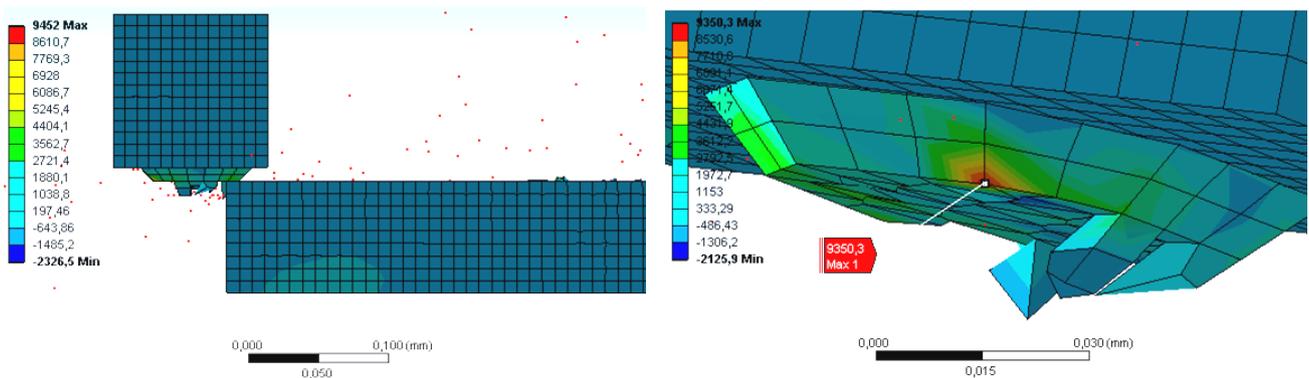


Рис. 7. Реализация физической модели самозатачивания режущей поверхности алмазного зерна

Литература

1. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Атомная визуализация алмазного резания // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 1. С. 161-172.
2. 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.

References

3. 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.
4. Попов В.Ю. Выбор программы для эмуляции физики резания // Механики XXI века. 2017. № 1. С. 21-26.
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. Матюшкин И.В. Моделирование и визуализация средствами MATLAB физики наноструктур. М.: Техносфера, 2011. 168 с.
7. Хлыстов А.Н. Автоматизация молекулярно-динамического моделирования // Механики XXI века. 2016. № 15. С. 255-259.
8. 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.
9. Грабченко А.И., Федорович В.А. 3D процессы алмазно-абразивной обработки: моногр. Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. 345 с.
10. Woodin C.T. Effects of dressing parameters on grinding wheel surface topography // Georgia Institute of Technology: Materials Science, 2014. 164 p.
11. Olufayo O.A., Abou-El-Hossein K. Molecular dynamics modeling of nanoscale machining of silicon // Procedia CIRP. 2013. № 8. P. 504-509.
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. 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.
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. 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.
16. 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.
17. Левченко Е.А., Саса Д.А. Исследование тепловых явлений при абразивной обработке // Вестн. современных технологий. 2020. № 4 (20). С. 36-40.
18. Зубаирова Л.Х., Свищев В.И. Определение остаточных напряжений от действия силы резания при шлифовании // СТИН. 2014. № 2. С. 35-37.
19. Иванова Т.Н. Физическая сущность деформаций деталей под действием остаточных напряжений при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2008. № 2 (39). С. 28-31.
20. 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.
1. 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.
2. Popov V.YU., YAnyushkin A.S., Hlystov A.N. On the destruction of diamond grains during grinding // Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science). 2017. № 5 (74). P. 16-23.
3. 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.
4. Popov V.YU. Choosing a program for emulating the physics of cutting // Mekhaniki XXI veku. 2017. № 1. P. 21-26.
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. Matyushkin I.V. Modeling and visualization by means of the MATLAB physics of nanostructures. M.: Tekhnosfera, 2011. 168 p.
7. Hlystov A.N. Automation of molecular dynamics modeling // Mekhaniki XXI veku. 2016. № 15. P. 255-259.
8. 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.
9. Grabchenko A.I., Fedorovich V.A. 3D processes of diamond abrasive processing: monogr. Har'kov: NTU «HPI», 2008. 345 p.
10. Woodin C.T. Effects of dressing parameters on grinding wheel surface topography // Georgia Institute of Technology: Materials Science, 2014. 164 p.
11. Olufayo O.A., Abou-El-Hossein K. Molecular dynamics modeling of nanoscale machining of silicon // Procedia CIRP. 2013. № 8. P. 504-509.
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. 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.
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. 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.
16. 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.
17. Levchenko E.A., Sasa D.A. Study of thermal phenomena during abrasive processing // Bulletin of modern technologies. 2020. № 4 (20). P. 36-40.
18. Zubairova L.H., Svirshchev V.I. Determination of residual stresses from the action of cutting force during grinding // STIN. 2014. № 2. P. 35-37.
19. Ivanova T.N. The physical essence of deformations of parts under the action of residual stresses during grinding // Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science). 2008. № 2 (39). P. 28-31.
20. 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.