

Д.О. Федоренко, Харьков, Д.В. Криворучко, д-р техн. наук, Сумы,  
В.А.Федорович д-р техн. наук, Харьков, Украина

## **ДИНАМИЧЕСКОЕ 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ В РЕЖИМЕ САМОЗАТАЧИВАНИЯ**

*Шліфування є найбільш поширеним високопродуктивним способом прецизійної обробки деталей машин. В цій статті розглянуті основні проблеми, виникаючі при шліфуванні у режимі самозаточування, а також розглянуті перспективи їх вирішення з використанням динамічного 3D моделювання по методу скінчених елементів.*

*Шлифование является наиболее распространенным высокопроизводительным способом прецизионной обработки деталей машин. В данной статье рассмотрены основные проблемы, возникающие при шлифовании в режиме самозаточивания, а также рассмотрены перспективы их решения с использованием динамического 3D моделирования по методу конечных элементов.*

*Grinding is the most common way to high-precision machining of machine parts. This article describes the main problems associated with self sharpening grinding process, as well as the prospects for their solution, using dynamic 3D finite element simulation.*

### **Введение**

Существенной проблемой при абразивной обработке деталей является снижение режущей способности в процессе эксплуатации шлифовальных кругов вследствие приспособляемости рабочей поверхности круга и обрабатываемой поверхности по причине износа абразивных зерен и засаливания рабочей поверхности круга. В результате эффективность шлифования снижается, возрастает давление на деталь в зоне резания, появляются дефекты обработки в виде прижогов и огранки [1]. Для восстановления режущей способности абразивного инструмента производят правку инструмента, которая заключается в принудительном удалении затупившихся зерен.

Вместе с тем при эксплуатации алмазных и эльборовых кругов, абразивные зерна которых отличаются повышенной хрупкостью, при определенных режимах шлифования проявляется полный либо частичный эффект самозаточивания [2, 3]. Самозаточивание заключается в постепенном и равномерном удалении затупившихся зерен со шлифующей поверхности круга. Самозаточивание имеет место в том случае, когда из-за затупления зерен давление, действующее на них, превышает прочность удерживающей их связки. Интенсивность самозаточивания алмазно-абразивного инструмента зависит от степени сопротивления, оказываемого связкой выкрашиванию зерен. Наиболее эффективное использование круга наблюдается в том случае, если связка удерживает зерна только до момента потери ими режущей способности.

В то же время при чрезмерно интенсивном самозаточивании из-за неравномерной нагрузки на зерна и неравномерного износа круг постепенно при-

обретает неправильную геометрическую форму, что приводит к увеличению погрешностей размеров, образованию на обрабатываемых поверхностях деталей волнистости и появлению вибраций [4].

Решающим фактором в повышении эффективности работы алмазно-абразивных инструментов является, на наш взгляд, рациональный подбор компонентов круга и применение научно обоснованных режимов резания, позволяющих существенно увеличить период стойкости шлифовальных кругов.

Современные тенденции создания наукоемкой продукции характеризуются резким расширением приложений математики, во многом связанным с созданием и развитием средств вычислительной техники [5]. Развитие вычислительной техники открывает перспективы разработки трехмерной (3D) методологии комплексного исследования взаимосвязанных процессов изготовления и эксплуатации алмазно-композиционных материалов (АКМ) и режущих инструментов из них, повышения их надежности.

Как свидетельствует международный опыт, моделирование процессов обработки является действенным инструментом для исследования факторов, определяющих эффективность шлифования и оптимизации процесса.

В настоящих исследованиях основным инструментом реализации теоретических экспериментов по моделированию процесса шлифования являются аналитические программные пакеты, основанные на методе конечных элементов (МКЭ). Эти программные продукты, известные под общим названием *Computer-aided engineering* (CAE), предназначены для инженерных расчетов, анализа и симуляции различных физических процессов и позволяют при помощи расчетных методов оценить, как поведет себя компьютерная модель изделия в реальных условиях эксплуатации. Работа таких программ чаще всего основана на численных методах решения дифференциальных уравнений, таких как метод конечных элементов, метод конечных объемов, метод конечных разностей и др. [6-9]. Основным преимуществом методов компьютерного моделирования является возможность прогнозирования работоспособности изделия, без существенных затрат времени и средств.

Эффективным способом для решения вышеуказанных проблем, на сегодняшний день, является моделирование процесса шлифования, в результате которого можно прогнозировать поведение инструмента в заданных условиях и определить критерии для обоснованного выбора материалов и конструкций при создании эффективного абразивного инструмента.

Исходя из изложенного, целью настоящей работы является динамическое 3D моделирование процесса шлифования в режиме самозатачивания, что позволит определить рациональные характеристики компонентов круга и режимы шлифования для обработки широкого спектра материалов. Для решения поставленной задачи с привлечением метода конечных элементов были проведены теоретические исследования, направленные на изучение факторов и

условий, определяющих реализацию режима самозатачивания шлифовальных кругов.

### **Методика применения решателя *LS-DYNA* для динамического 3D моделирования процессов алмазно-абразивной обработки инструментом из СГМ**

*LS-DYNA (LSTC)* – многоцелевая программа, предназначенная для решения трехмерных динамических нелинейных задач механики деформируемого твердого тела, механики жидкости и газа, теплопереноса, а также связанных задач – механики деформированного твердого тела и теплопереноса, механики деформируемого твердого тела и механики жидкости и газа. Преимуществом данного программного продукта является повышенная производительность при моделировании многокомпонентных систем. Общая концепция проведения динамических модельных экспериментов представлена на рис 1.

Проведение модельных экспериментов по изучению динамики изменения 3D НДС системы «алмазное зерно – металлофаза – связка – обрабатываемый материал» при шлифовании в режиме самозатачивания проводилось в такой последовательности:

1. *Построение геометрической модели «алмазное зерно – металлофаза – связка – обрабатываемый материал» в программном пакете SOLIDWorks*

Заготовка создавалась в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами 500х600х100мкм. Абразивное зерно имело геометрию октаэдра и соответствовало зернистости 100х80 мкм. С целью моделирования марки зерна в него была помещена металлофаза призматической формы размерами 50х70х10 мкм, объем которой составил 7% от объема зерна, что соответствует марке алмазного порошка АС4. Связка моделировалась в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами 500х500х250 мкм на одной из граней которого были произвольно размещены три посадочных поверхности под абразивные зерна. Для воспроизведения структуры круга в теле связки были созданы поры сложной геометрической формы. Соотношением объема связки к общему объему зерен задавалась концентрация, равная, в нашем случае 10%.

2. *Сборка модели системы и ее экспорт из конструкторского модуля SOLIDWorks в расчетный комплекс ANSYS.*

В программе ANSYS осуществлялся выбор типа конечных элементов из библиотеки пакета для каждого компонента системы, построение сетки конечных элементов и ее селективное сгущение. Для заготовки использовались конечные элементы типа *Hex Dominant* прямоугольной формы, сгущение выполнялось по направлению к зоне контакта заготовки с абразивными зернами. На остальных элементах системы конечно-элементная сетка формировалась элементами типа *Tetrahedron*. Сгущение сетки выполнялось в областях задел-

ки абразивных зерен в связку, в местах контакта зерен с заготовкой и включения металлофаз.

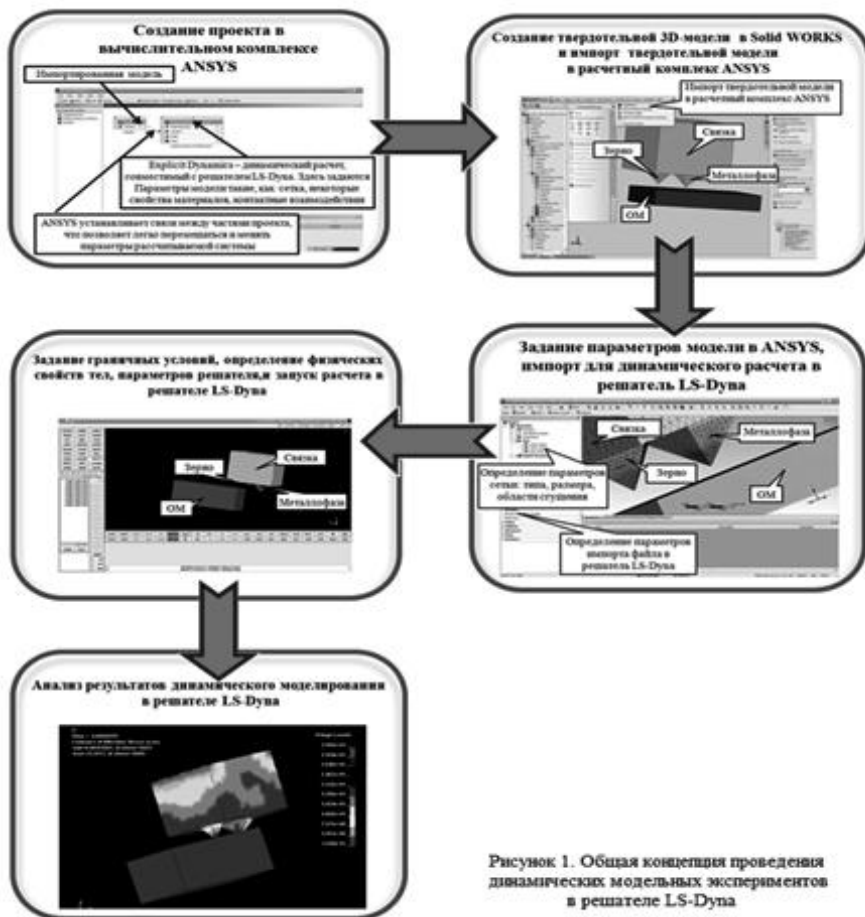


Рисунок 1. Общая концепция проведения динамических модельных экспериментов в решателе LS-Dyna

3. Закрепление конечноэлементной модели (задание нулевых или других заданных перемещений).

Произведено с использованием атрибутов геометрической модели (точки, линии, поверхности).

4. Экспорт данных конечноэлементной модели в модуль решателя LS-Dyna.

5. Задание свойств материалов для каждой зоны конструкции.

Для алмазных зерен и обрабатываемого материала использовался критерий разрушения по Джонсону-Холмквисту (Johnson-Holmquist). Модель по-

ведения материала Джонсона-Холмквиста впервые предложена для описания реакции хрупких материалов при больших деформациях. В данных расчетах применялась вторая версия этой модели, известная как JH-2 [10] в которой прочность и повреждение материала рассматриваются как функции от представляющих переменных. Более того, в материале рассматривается развитие повреждений.

Модель JH-2 [10] требует несколько определяющих параметров для полного описания реакции конкретного материала. Первоначально реакция материала считается упругой, НДС которой полностью описывается упругими свойствами материала (модуль сдвига) и уравнением состояния.

При сжимающих нагрузках, когда девиатор напряжений превышает критическое значение, в материале начинают накапливаться повреждения. Это накопление повреждений отслеживается через параметр повреждения FS (Failure criteria) (от 0 до 1.0), и соответствующие необратимые или пластические деформации. При растяжении, материал реагирует упруго до хрупкого разрушения при указанном эффективном значении напряжения, что соответствует полному мгновенному разрушению. Несмотря на то, что модель JH-2 не учитывать эффекты скорости деформации, было отмечено, что эти эффекты, как правило, вторичны по сравнению эффектами от давления [9, 10]. Это подтверждено экспериментально, и находит отражение в типичных значениях для констант в модели. В настоящее время прочность материала определяется из уравнения 1:

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i - \sigma_f) \quad (1)$$

где,  $D$  – накопленное повреждение материала,  $\sigma^*$  – текущая нормальная прочность,  $\sigma_i$  – прочность не разрушенного материала,  $\sigma_f$  – прочность разрушенного материала

6. *Расчет созданной конечноэлементной модели в конкретном модуле расчетчика в зависимости от типа задачи.*
7. *Вывод и интерпретация результатов расчета (на экран, в выходной файл).*

### **Результаты и их обсуждение**

В результате проведенных расчетов получены эпюры динамического распределения полей напряжений при шлифовании группой зерен, а также рассчитаны объемы разрушенного материала для заготовки и зерен. Пошаговая визуализация распределения напряжений и в группе абразивных зерен и обрабатываемом материале, а также характер и объем разрушений элементов системы проиллюстрированы на рис.2.

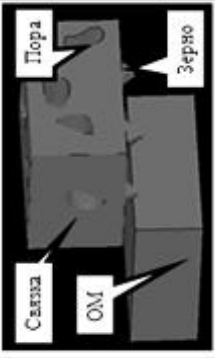


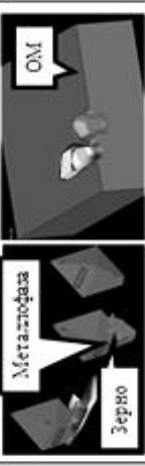
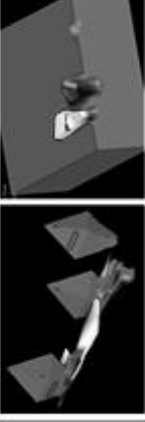


| Шар диспергирования № 1<br>Время $T=0$ с  | Шар диспергирования № 2<br>Время $T=0,0098$ с                                      | Шар диспергирования № 3<br>Время $T=0,011$ с  |
|---|--|---|
| Распределение напряжений в системе шлифованок   |  |   |
|                            |  |                              |
| Разрушение зерна и обрабатываемого материала  |  |   |
| Врезание отсутствует  |  |                              |
| Врезание отсутствует  |  |                              |
| Объем разрушенного материала обрабатываемого материала<br>$V_{\text{разр}} = 0,0023 \text{ e-}06 \text{ м}^3$ |  | Объем разрушенного материала обрабатываемого материала<br>$V_{\text{разр}} = 0,0054 \text{ e-}06 \text{ м}^3$ |

Рисунок 2 – Визуализация распределения напряжений и разрушений абразивных зерен и обрабатываемого материала на i-том шаге

## Выводы

Впервые смоделированы эксперименты в программном пакете *LS-Dyna*, что позволило изучить 3D НДС системы «ОМ – зерно – металлофаза – связка» в динамике при моделировании процесса шлифования максимально приближенного к реальному процессу абразивной обработки в режиме самозатачивания. В ходе эксперимента получены значения эквивалентных напряжений и проанализированы их динамические изменения.

Показано, что концентрация зерен в круге, а также их ориентация друг относительно друга, играет большую роль в сохранении его целостности. В случае, если алмазные зерна ориентированы таким образом, что их металлофазы находятся в непосредственной близости друг от друга, напряжения будут максимальными, что может привести к образованию трещин в зернах. Такое наблюдение может быть объяснено наложением полей напряжений.

Установлено, что фактор пористости связки (количество, размеры пор и характер их распределения) в большой степени определяет возникновение критических напряжений, приводящих к выкрашиванию затупившихся зерен, а следовательно обуславливает возможность управления процессом самозатачивания за счет регулирования характеристик пористости связки.

Предложенная методология позволяет расчетным путем определить рациональные сочетания физико-механических свойств связки, марки алмазных зерен, их зернистость и концентрацию, а также режимы шлифования, при которых будет реализован режим самозатачивания алмазно-абразивных кругов, обеспечивающий максимальный коэффициент использования потенциально высоких режущих свойств алмазных зерен.

**Список использованных источников:** 1 Сулов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.; 2 Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. – Харьков: Вища школа, 1985. – 184 с.; 3 Антонюк В.С., Волкогон В.М. и др. Высокоэффективная обработка деталей технологического оборудования инструментом из ПСТМ на основе плотных модификаций нитрида бора // Резание и инструмент в технологических системах.– Междунар. науч.-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008.– Вып.74.– с. 7–13; 4 Мишинаевский Л. Л. Износ шлифовальных кругов. – Киев: Наукова думка, 1982. – 192 с.; 5 Худобин Л. В., Унянин А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 298 с.; 6 Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Уч. пособие / Под. ред. А.И. Грабченко. - Харьков: ХГПУ, 1999. - 436 с.; 7. Gol'din V.V., Zhuravskii V.G. and other. CALS technologies and tolerant translators Automation and Remote Control, Volume 68, Number 4, 710-726; 8 Jackson M. J., Davis C. J and other. High-Speed Grinding with с.В.Н. Grinding Wheels – Applications and Future Developments, Journal of Materials Processing Technology (2001), 110, 78-88. ISSN 0924-0136; 9 Jackson M. J., Barlow N. and other. Computer Aided Design of High-Performance Grinding Tools, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (London), Part B - Journal of Engineering Manufacture, (2001), 215, 583-588. ISSN 0954-4054; 10 Duane S. Cronin K., and other. Implementation and Validation of the Johnson-Holmquist Ceramic Material Model in LS-Dyna, 4<sup>th</sup> European LS-DYNA Users Conference.- p. 47-60

Поступила в редакцию 15.06.2012