

УДК 621.923

В.А. Федорович, д-р техн. наук, И.Н. Пыжов, д-р техн. наук,  
С.С. Кронов, Харьков, Украина

### **3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ**

*Шляхом моделювання методом кінцевих елементів процесу ультразвукового шліфування встановлено, що при шліфуванні без накладання високочастотних коливань максимальне навантаження концентрується на певній межі алмазного зерна. Це може послужити руйнування зерна в зоні контакту зі зв'язкою і його подальшого передчасного випадання з неї. У випадку накладання високочастотних коливань, напруги рівномірно розподіляються вздовж усього зерна, що покращує його утримання у зв'язці.*

*Путем моделирования методом конечных элементов процесса ультразвукового шлифования установлено, что при шлифовании без наложения высокочастотных колебаний максимальная нагрузка концентрируется на определенной грани алмазного зерна. Это может послужить разрушению зерна в зоне контакта со связкой и его последующему преждевременному выпадению из нее. В случае же наложения высокочастотных колебаний, напряжения равномерно распределяются вдоль всего зерна, что улучшает его удержание в связке.*

*By finite element simulation of ultrasonic grinding found that when grinding without imposing high frequency oscillations of the maximum load is concentrated on certain faces of diamond grains. This can be the destruction of grain in the contact zone with a bunch and its subsequent premature dropout from it. In the case of imposition of high-frequency oscillations of voltage are evenly distributed along the grain, that improves its hold together.*

**1. Постановка проблемы.** В настоящее время в мировой практике для изучения процессов механической обработки материалов широко применяются программные продукты, основанные на методе конечных элементов (МКЭ) типа MATHCAD, MATLAB, ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, LS-DYNA, COSMOS, CATIA, PTC CREO [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Это позволяет с одной стороны существенно снизить затраты на проведение исследований, а с другой - получить физическое толкование явлений происходящих в зоне обработки.

**2. Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время доказано, что отмеченный подход эффективен и применительно к такому сложному процессу обработки каким является шлифование [7, 8]. Однако данных по моделированию процесса ультразвукового шлифования в отечественной и зарубежной литературе практически нет. Это объясняется существенными трудностями моделирования таких процессов. В связи с этим нами сделана одна из первых попыток решения этой задачи.

**3. Цель исследования.** Целью настоящей работы является выполнение компьютерного 3D моделирования процесса ультразвукового шлифования с помощью прикладного пакета программ *CosmosWorks*, в основу которого положен метод конечных элементов (МКЭ).

**4. Основные материалы исследований.** Нами применен следующий алгоритм решения задачи с использованием исследовательских пакетов по МКЭ: *Построение геометрической модели конструкции* (или экспорт этой модели из конструкторского модуля). Используемые при этом элементы построения ранжируются по возрастанию приоритетов:  $pt \rightarrow cr \rightarrow sf \rightarrow vl$  (точка  $\rightarrow$  линия  $\rightarrow$  поверхность  $\rightarrow$  объем). В нашем случае, например, при рассмотрении процесса резания единичным зерном с использованием элементов *VL* создается трехмерная (3D) модель системы «алмазное зерно – связка - ОМ» (рис. 1).

Задание свойств материалов для каждой зоны конструкции происходит с использованием стандартной базы данных. При необходимости, есть возможность корректировки свойств материала или создание нового материала. В качестве свойств материалов использовались модуль упругости, коэффициент Пуассона, массовая плотность, коэффициент термического расширения, теплопроводность, удельная теплоемкость.

*Построение конечноэлементной модели* (разбиение конструкции на конечные элементы). На этом этапе, на базе геометрической модели, состоящей из точек, линий, поверхностей и объемов ( $pt\ cr\ sf\ vl$ ), создается конечноэлементная модель, состоящая из узлов и элементов.

При исследовании зоны шлифования модель нагружалась как заданием перемещения  $U_y$  (рис. 1 – зеленые стрелки) верхней плоскости связки (кинематическое воздействие в виде поперечной подачи  $S_{non}$ ), так и приложением давления к верхней плоскости связки  $P$  (силовое воздействие нормальной и тангенциальной составляющих силы резания).

Для того чтобы воссоздать вибрационное резание давление, перпендикулярно приложенное к верхней грани связки (рис. 1 – красные стрелки) варьировалось во времени. В среде *CosmosWorks* гармоническая нагрузка задавалась в виде синусоиды (рис. 2) с амплитудой равной величине принятого давления и частотой от 10 до 50 кГц.

Задачей данного исследования является определение влияния УЗК, прикладываемых к шлифовальному кругу с помощью специального устройства, на производительность процесса. О последней судили косвенным путем по значению эквивалентных напряжений ( $\sigma_{экр}$ ), определяемых путем теоретического исследования НДС в зоне шлифования. Результаты 3D моделирования НДС зоны ультразвукового шлифования (связка круга на основе меди, ОМ – алмаз, давление, приложенное к верхней грани 2 МПа, давление, приложенное к боковой грани 1 МПа) представлены на рис 3.

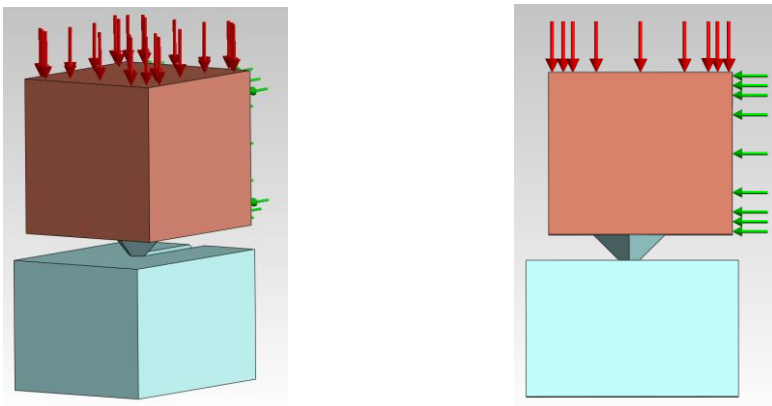


Рисунок 1– 3D модель системы «алмазное зерно – связка - ОМ» с указанными направлениями

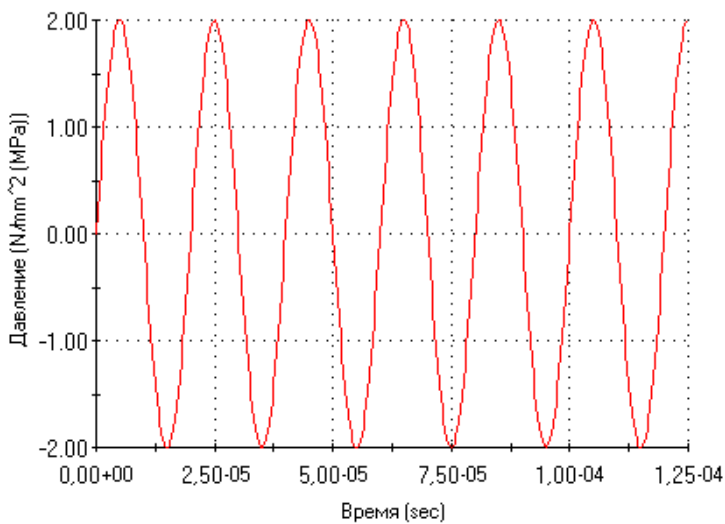


Рисунок 2 – Гармоническая нагрузка (синусоида,  $A=2\text{МПа}$ ,  $f=50\text{ кГц}$ )

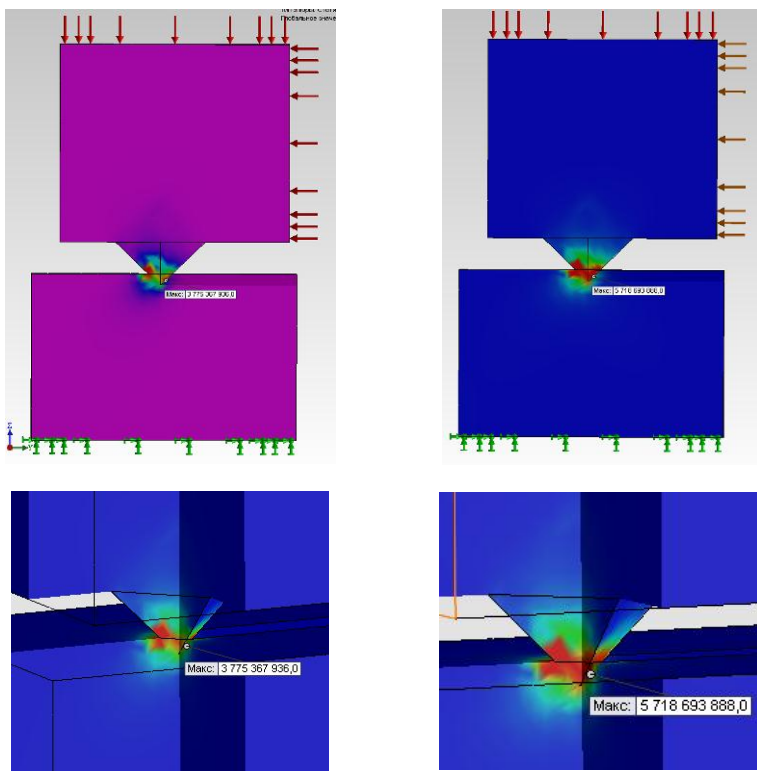


Рисунок 3 – Величина  $\sigma_{\text{экр.}}$  в системе «алмазное зерно – связка - ОМ»  
 а) –  $f = 0$  кГц; б) –  $f = 50$  кГц

Основной причиной высокой себестоимости процесса алмазного шлифования, наряду с высокой стоимостью алмазных кругов, является чрезвычайно низкий коэффициент использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен. Часто зерна не используют свой режущий потенциал из-за преждевременного выпадения из связки. Поэтому является важным путем моделирования изучить НДС в зоне контакта «зерно-связка» при ультразвуковом шлифовании.

Была создана 3D модель со следующими параметрами: ОМ – алюминий, связка – на основе меди, давление прижима 2 МПа, давление, создаваемое тангенциальным усилием 1 МПа, в первом случае вибрационные колебания отсутствовали во, втором частота колебаний составляла 50 кГц амплитуда 2 МПа.

Проведенные расчеты (рис. 4) показали, что при наложении УЗК напряжения, возникающие в зоне контакта «зерно-связка», незначительно превышают максимальные значения напряжений по сравнению с обычным шлифованием.

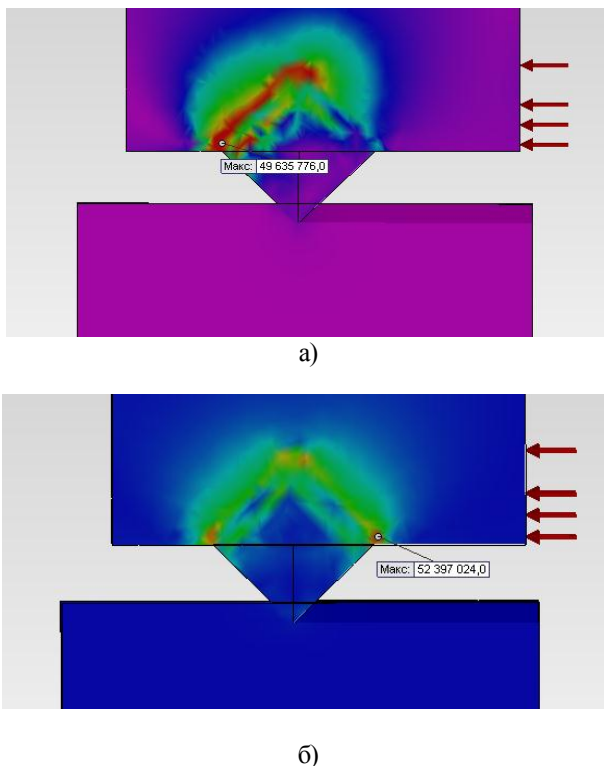


Рисунок 4 – Значения  $\sigma_{\text{кв}}$  в зоне контакта «зерно - связка»

а) –  $f = 0$  кГц; б) –  $f = 50$  кГц

В случае ультразвукового шлифования выделение теплоты происходит импульсами во время действия импульсов сил резания. При этом происходит импульсное повышение температур обрабатываемого материала и алмазного зерна в зоне резания и в контакте «зерно-связка».

В каждый момент времени температура в зоне шлифования определяется двумя процессами: нагревом, определяемым удельной теплоемкостью материалов, и охлаждением, определяемым коэффициентами их теплопроводности и градиентом температуры.

В промежутках между импульсами происходит процесс охлаждения нагретых зон детали и шлифовального круга. В результате этого средняя температура в зоне шлифования при обработке с УЗК оказывается значительно ниже, чем при традиционном шлифовании. На рисунке 5 показаны известные осциллограммы изменения температуры образца при обычном шлифовании и обработке с УЗК.

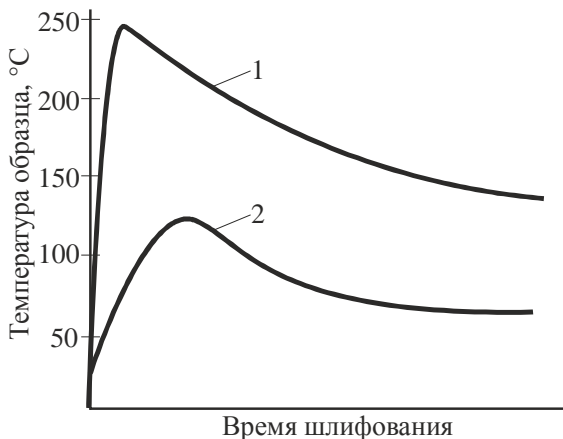


Рисунок 5 – Осциллограммы изменения температуры образцов из стали при шлифовании [2]

Вначале проводили шлифование без УЗК при глубине резания  $t=0,05$ мм (кривая 1), а затем с УЗК и глубиной резания  $t=0,076$ мм (кривая 2). При шлифовании образца, совершавшего высокочастотные колебания, несмотря на большую глубину резания, максимальная температура образца в исследованной зоне оказалась примерно в 2 раза меньше, чем при обычном шлифовании. Уменьшение температуры при шлифовании с колебаниями можно объяснить уменьшением угла контакта абразивных зерен и уменьшением коэффициента трения зерен круга и материала детали.

Приняв сказанное выше во внимание, можно утверждать, что если бы в нашей модели учитывался температурный фактор, то значения  $\sigma_{\text{экв}}$  в зоне контакта «зерно-связка» при традиционном шлифовании значительно превышали бы напряжения, возникающие при ультразвуковом шлифовании.

При изучении объемного НДС зоны контакта «зерно - связка» (рис. 6, условия те же, что и на рисунке 4) было установлено, что в случае наложение УЗК напряжения равномерно распределяются вдоль всего зерна, что улучшает его удержание в связке.

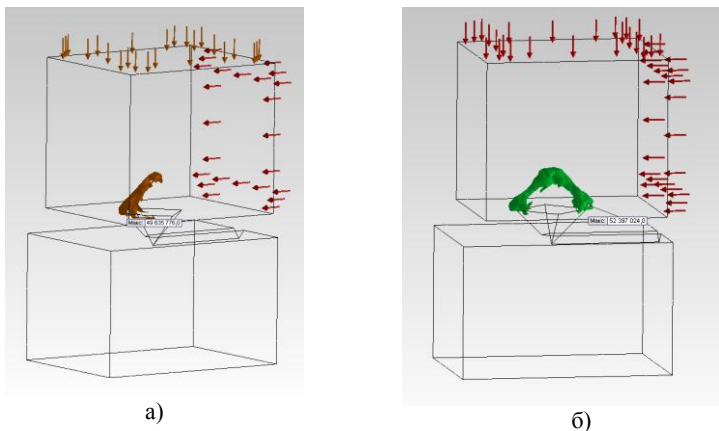


Рисунок 6 – Объемное НДС зоны контакта «зерно - связка»  
 а) –  $f = 0$  кГц; б) –  $f = 50$  кГц

При моделировании шлифования без вибрационных колебаний, максимальная нагрузка концентрируется на определенной грани алмазного зерна. Это может привести к выпадению зерна из связки. Нами проведен ряд модельных экспериментов, на основе которых были получены одномерные зависимости максимальных эквивалентных напряжений от частоты колебаний при различных значениях модуля упругости связки шлифовального круга. Эти данные представлены на рис. 7.

**5. Выводы и перспективы развития.** Таким образом, впервые сделана попытка теоретической оценки влияния УЗК при шлифовании на НДС в зоне контакта «алмазное зерно-связка». Проведенные исследования показали, что при наложении УЗК нагрузки, возникающие в контакте «зерно-связка», незначительно превышают максимальные значения напряжений для случая обработки без колебаний. Установлено, что в случае наложение УЗК напряжения равномерно распределяются вдоль всего зерна, что улучшает его удержание в связке.

При моделировании шлифования без вибрационных колебаний, максимальная нагрузка концентрируется на определенной грани алмазного зерна, что может послужить нарушению целостности зоны контакта, а, следовательно, выпадению зерна из связки круга. Показана роль частоты колебаний при использовании связок с различным модулем упругости: для повышения производительности шлифования необходимо использовать связки с большим модулем упругости. Этот эффект можно объяснить тем, что распространяющиеся в любой среде упругие волны испытывают поглощение. При этом энергия звуковых волн переходит в тепловую энергию.

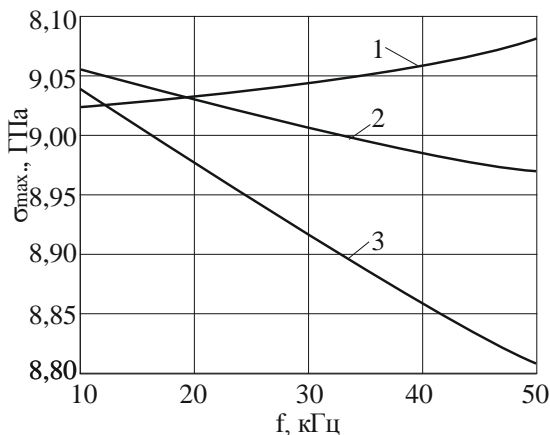


Рисунок 7 – Зависимость  $\sigma_{max}$  от частоты колебаний при различных значениях модуля упругости связки  $\mu$ :  
 1 –  $\mu=680$  ГПа; 2 –  $\mu=395$  ГПа; 3 –  $\mu=110$  ГПа

В дальнейшем представляет научный и практический интерес проведение исследований, направленных на оптимизацию процесса шлифования с наложением УЗК.

**Список использованных источников:** 1. *Huang J. M.* An Evaluation of Chip Separation Criteria for the FEM Simulation of Machining / J. M. Huang, J. T. Black// of Manuf. Science and Engineering: Trans. of ASME. – 1996. -Т. 118, № 4. – С. 545-554. 2. *Zaghbani I.* A thermo-mechanical coupled f.e.m model for orthogonal cutting / I. Zaghbani , W. Bouzud, K. SaI //Proceedings of the 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. – 2005. – С. 139-145. 3. *Frydryšek K.*: Aplikace pravděpodobnostni metody SBRA ve vědecko-technicke praxi (Application of Probabilistic SBRA Method in the Scientific and Technical Practice), written in Czech language, inaugural dissertation in the branch of Applied Mechanics, Department of Mechanics of Materials, FME VŠB-TU Ostrava, CZ, pp.144, 2009. 4. *Bil H.* 2D Finite Element Modeling of Machining: A Comparison of Different. Approaches with Experiments / Bil H., A. E. Tekkaya, E. S.Kılıç // Proceedings of the 7th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. – 2004.– Режим доступа до статьи: <http://congress.cimne.com/complas05/admin/Files/FilePaper/p176.pdf>. 5. *O. Galli.* Hochleistungs bearbeitung von Holz und Holzersatzstoffen mit PKD-Werkzeugen. – Режим доступа до статьи: [http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2004\\_1/12\\_art/Art12\\_01\\_04.htm](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2004_1/12_art/Art12_01_04.htm). 6. *Криворучко Д.В.* Моделирование процессов резания методом конечных элементов : методологические основы : монография / Д.В. Криворучко, В.А. Залого. Под общей редакцией В.А. Залого – Сумы: Университетская книга, 2012. – 450 с. 7. *Федорович В.А.* Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Федорович Владимир Алексеевич. – Харьков: – 2002. – 466 с. 8. *Пыжов И.Н.* Научные основы формообразования лезвийных инструментов из поликристаллических сверхтвердых материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Пыжов Иван Николаевич. – Харьков: – 2009. – 457 с.

Поступила в редколлегию 03.07.2013