

УДК 621.923

**В.А. ФЕДОРОВИЧ**, д-р техн. наук,  
**И.Н. ПЫЖОВ**, д-р техн. наук,  
**С.С. КРОНОВ**, Харьков, Украина

## **МЕТОДИКА 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ШЛИФОВАНИЯ**

Розроблено методику 3D моделювання вібраційної алмазно-абразивної обробки на базі створеної скінченно-елементної моделі процесу. Розрахунки напружено-деформованого стану зони шліфування свідчить про суттєвий вплив високочастотних вібраційних коливань на обсяг зруйнованого матеріалу. Еквівалентні напруження в зоні шліфування зростають в 1,5 - 2 рази.

Разработана методика 3D моделирования вибрационной алмазно-абразивной обработки на базе созданной конечно-элементной модели процесса. Расчеты напряженно-деформированного состояния зоны шлифования свидетельствует о существенном влиянии высокочастотных вибрационных колебаний на объем разрушенного материала. Эквивалентные напряжения в зоне шлифования возрастают в 1,5 – 2 раза.

Developed a method of 3D modeling of the vibration diamond-abrasive treatment on the basis of established finite element model of the process. Calculations of the stress-strain state of the grinding area testifies to the considerable influence of high-frequency vibration on the amount of the destroyed material. Equivalent stresses in the zone of grinding grow 1,5 – 2,0 times.

**1. Постановка проблемы.** Перспективным направлением повышения производительности и улучшения качества поверхности при алмазно-абразивной обработке является введение в зону резания ультразвуковых колебаний (УЗК) малой амплитуды. Установлено, что ультразвуковые колебания оказывают положительное влияние на силы при микрорезании отдельными зернами и в целом на съём обрабатываемого материала (ОМ) и тем самым способствуют повышению эффективности абразивной обработки [1, 2].

Установлено, что общей закономерностью воздействия УЗК на различные процессы абразивной обработки является то, что съём металла

носит незатухаючий характер і продовжується весь цикл обробки. Со временем он практически не меняется, к тому же инструмент не теряет своих режущих свойств, постоянно работая в режиме самозатачивания. Причиной этого является то, что УЗК интенсифицируют процесс разрушения и диспергирования режущих зерен, способствуя с одной стороны активному обновлению режущих микрокромки на их поверхностях, а с другой (при определенных условиях) и удалению их из связки. Благодаря этому засаливание рабочей поверхности кругов (РПК) практически отсутствует. В результате производительность процесса практически не зависит от времени обработки. Соизмеримость амплитуд колебаний и толщин среза, а также скоростей при обработке повышают ее производительность до 3-4 раз при одновременном снижении износа инструмента.

**2. Анализ последних исследований и публикаций.** Экспериментальные исследования ультразвуковой алмазно-абразивной обработки представляют определенную трудоемкость, а, следовательно, и являются дорогостоящими. В настоящее время весьма перспективным и эффективным расчетным методом исследования зоны резания является использование программных продуктов основанных на методе конечных элементов [3, 4, 5, 6]. В Украине защищена первая докторская диссертация по моделированию процесса резания методом конечных элементов [7].

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

**4. Основные материалы исследований.** Идея метода состоит в моделировании реального объекта совокупностью конечных элементов (одномерных, двумерных, трехмерных), выполнении условий их сочленения, нагружения, закрепления и анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) такой конечноэлементной модели.

При этом независимо от используемого программного обеспечения эффективный алгоритм создания модели может быть представлен последовательностью действий, вмещающей в себя шесть основных этапов:

- 1 - создание объектов;
- 2 - составление объектов в систему с заданием свойств контактного взаимодействия;
- 3 - задание граничных и начальных условий, а также нагрузок;
- 4 - задание типа задачи и временной области ее решения;
- 5 - определение порядка и объема сохранения результатов расчета;
- 6 - определение дополнительных параметров.

При изучении процесса вибрационного шлифования, прежде всего, необходимо определить влияние УЗК, прикладываемых к РПК во время шлифования, на НДС системы «связка - зерно - ОМ». Используемый нами программный пакет *CosmosWorks* позволяет проводить трехмерное статическое моделирование. Прежде всего, была построена исходная 3D-модель «связка – алмазное зерно – ОМ» (рис. 1).

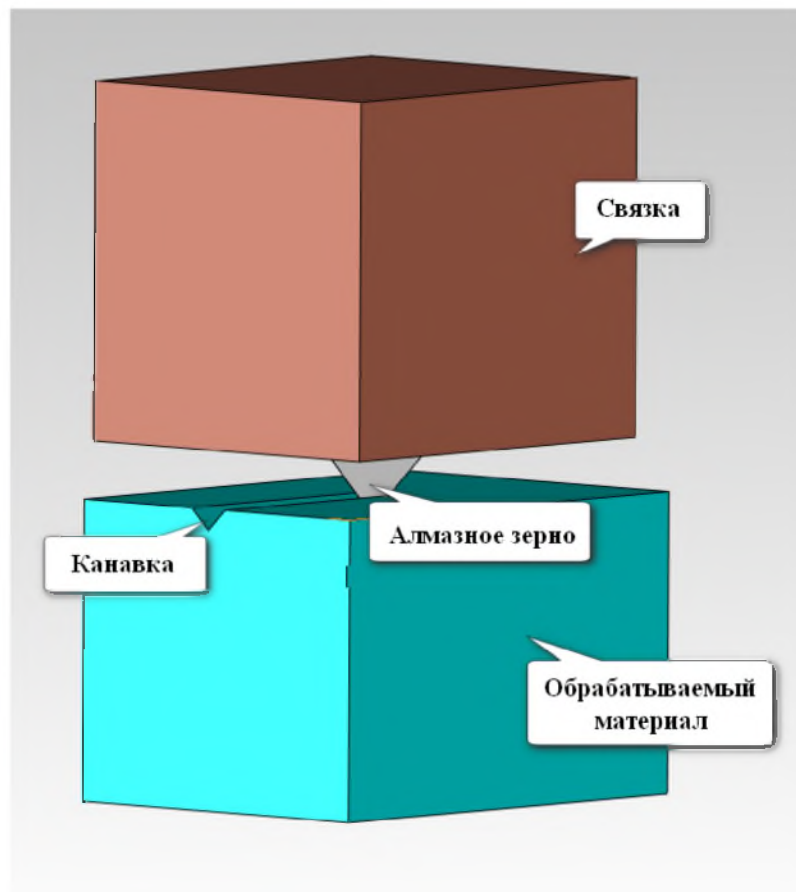


Рисунок 1 – Исходная 3D-модель системы «связка - зерно - ОМ»

Заготовка и фрагмент связки представлялись в виде пластин, а алмаз с геометрией октаэдра. В пластине ОМ была создана канавка (след от зерна). Далее производилось генерирование сетки конечных элементов и ее сгущение в области контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом (рис. 2).

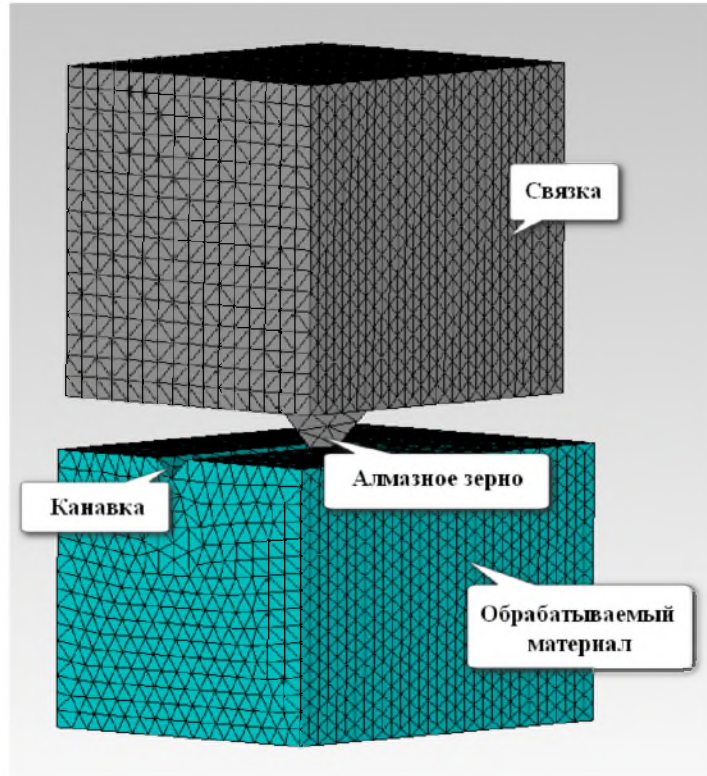


Рисунок 2 – Исходная 3D-модель системы «связка – зерно – ОМ» с сеткой конечных элементов

Затем были заданы физико-механические свойства всех элементов системы, представленные на рисунке 3. Отметим, что в исходной модели была использована связка на основе меди, в качестве обрабатываемого материала – алмаз, марка алмазного зерна принималась как АС 100. Для задач как без использования УЗК, так и с их использованием все начальные условия были заданы одинаково, отличие состояло только в наличии или отсутствии самих ультразвуковых колебаний.

Следующим этапом моделирования являлось задание параметров нагружения модели. В ходе расчетного эксперимента, модель нагружалась распределенной нагрузкой приложенной к верхней грани связки, что

позволяло моделировать усилие прижима алмазного шлифовального круга во время абразивной обработки. С целью моделирования подачи равномерная нагрузка прикладывалась к боковой грани связки (рис. 4).

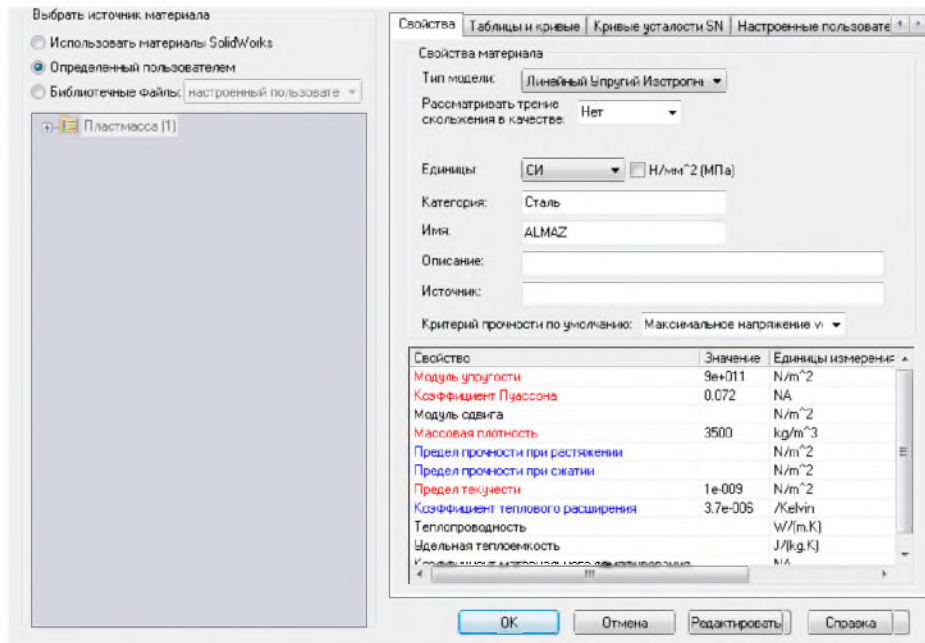


Рисунок 3 – Задание физико-механической свойств зерна марки AC100

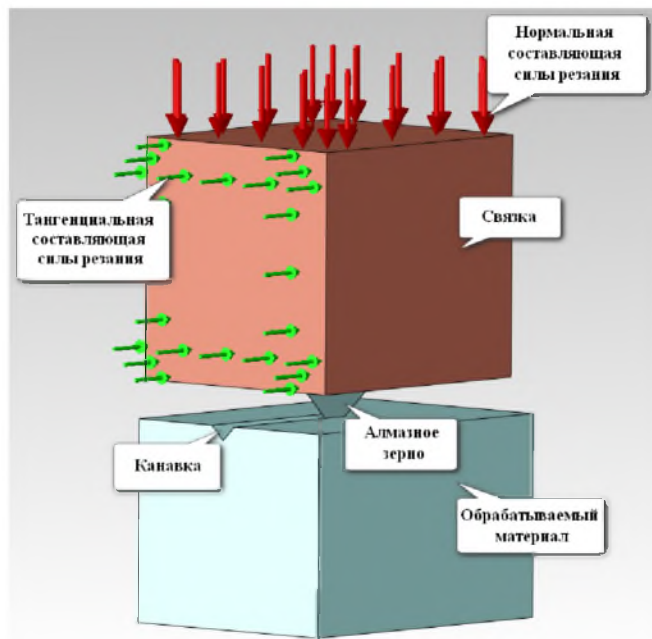


Рисунок 4 – Задание параметров нагружения 3D модели

Для моделирования вибрационного шлифования усилие прижима алмазного шлифовального круга варьировали во времени.

Для этого усилие прижима задавалось как гармоническая нагрузка, график которой был создан заранее в виде синусоиды (рис. 5) с частотой  $10 \div 50$  кГц и амплитудой (А), выраженной в единицах давления.

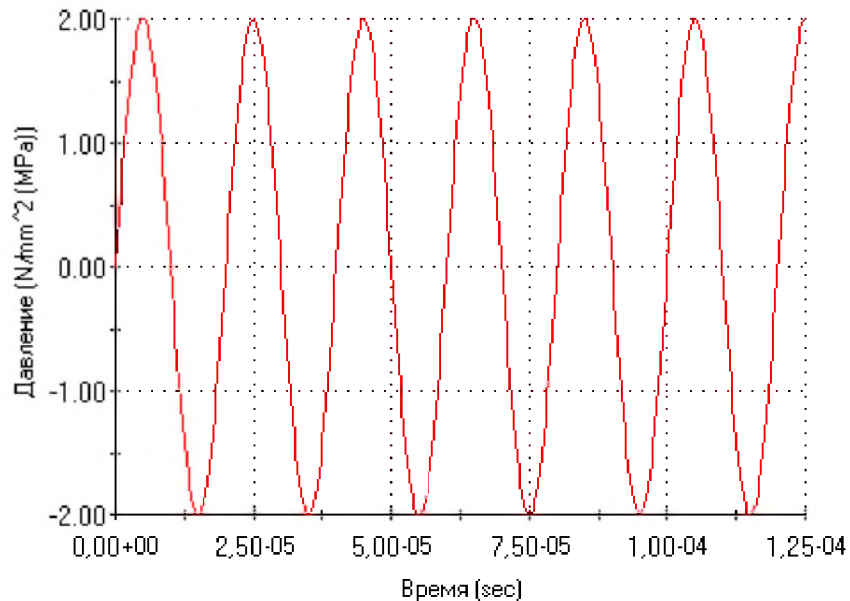


Рисунок 5 – График гармонической нагрузки ( $f=50$  кГц,  $A=2$  МПа)

*Влияние вибрационных колебаний на НДС зоны шлифования.* В исходной модели рассматривалось алмазное зерно марки АС100 зернистостью 200/160, обладающее следующими прочностными характеристиками:  $\sigma_{\text{раст.}}=2,2$  ГПа;  $\sigma_{\text{сж.}}=12,9$  ГПа [8].

В первой части расчетов задавалось усилие прижима (нормальная составляющая силы резания), реализующая давление на алмазное зерно равное 2 МПа, величина усилия, создаваемая тангенциальной составляющей силы резания, равная 1 МПа. В качестве обрабатываемого материала принят алмаз, а материала связки на основе меди. Для моделирования вибрационного шлифования усилие прижима задавалось с частотой колебаний  $f=50$  кГц (рис. 5). Задачей исследования на данном этапе являлось определение влияния ультразвуковых колебаний на производительность шлифования путем определения НДС зоны обработки

(рис. 6). При этом в качестве косвенного параметра, характеризующего производительность, служила величина  $\sigma_{\text{экв}}$ .

На основании проведенных модельных экспериментов по определению НДС зоны шлифования можно сделать вывод о существенном влиянии УЗК на объем разрушенного материала.

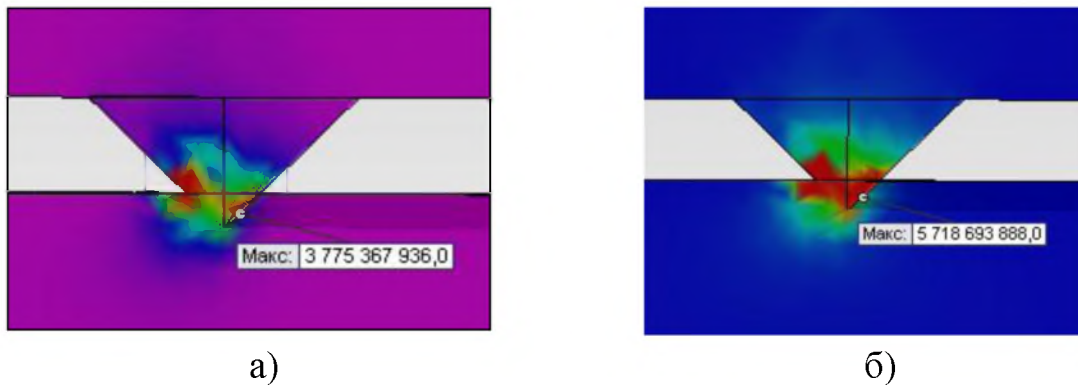


Рисунок 6 – Уровень  $\sigma_{\text{экв}}$  при шлифовании без УЗК (а) и с УЗК (б)

Во второй части расчетов учитывалось влияние частоты УЗК на изменение величины эквивалентных напряжений. Условия эксперимента: Обрабатываемый материал – алюминий, материал связки – на основе меди, усилие прижима 2 МПа, усилие создаваемое подачей 1 МПа. В первом случае обработка велась без введения УЗК, во втором и третьем с УЗК (частота колебаний  $f=10$  кГц и  $f=50$  кГц соответственно, рисунки 7 и 8).

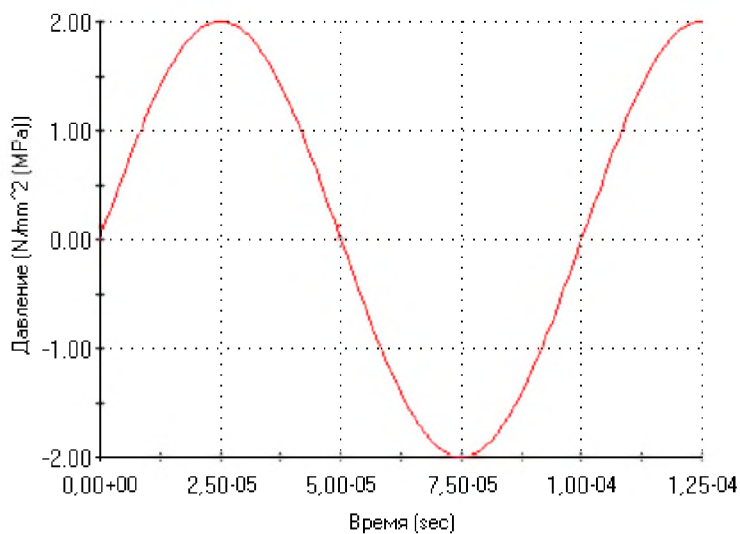
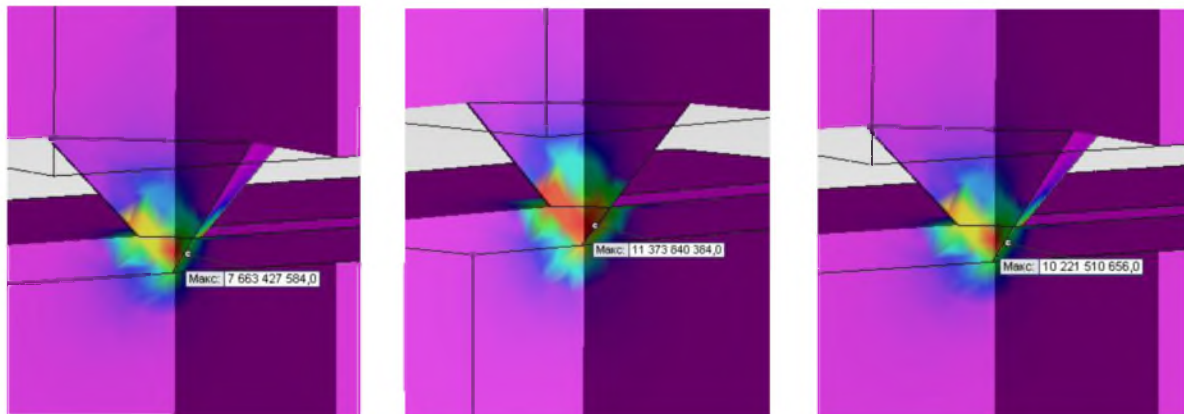


Рисунок 7 – График гармонической нагрузки (частота  $f=10$  кГц,  $A=2$  МПа)



а)- $\sigma_{\text{экв.}}=7,7$  ГПа  
( $f=0$  кГц)

б)- $\sigma_{\text{экв.}}=11,4$  ГПа  
( $f=10$  кГц)

в)- $\sigma_{\text{экв.}}=10,2$  ГПа  
( $f=50$  кГц)

Рисунок 8 – Влияние частоты УЗК на величину  $\sigma_{\text{экв.}}$ .

Проведенные расчеты показали, что с повышением частоты УЗК, прикладываемых к модели, НДС в зоне резания существенно меняется. Этот эффект можно использовать на практике. Путем изменения частоты УЗК появляется возможность существенно снизить гамму шлифовальных кругов в плане их характеристик. Т.е. используя круги ограниченного диапазона характеристик, можно достичь таких же результатов, для получения которых ранее требовались шлифовальные круги довольно большой набор характеристик.

**5. Выводы и перспективы развития.** Предложена методика 3D моделирования процесса шлифования с наложением УЗК, основанная на МКЭ. С ее помощью установлено, что:

1. Теоретический подход к изучению НДС системы «ОМ – зерно – связка» в специализированном пакете программ *CosmosWorks* позволяет исследовать влияние УЗК на НДС зоны шлифования при различных силовых нагрузках, а также рассчитать  $\sigma_{\text{экв.}}$  в исследуемой системе при варьировании параметров УЗК, упругопластичных свойств связки и обрабатываемого материала.

2. Расчеты НДС зоны шлифования указывают на существенное влияние УЗК на объем разрушенного ОМ, свидетельством чему служит увеличение  $\sigma_{\text{экв.}}$  в зоне шлифования в 1,5 – 2 раза.

3. Предложенный подход позволяет расчетным путем определить рациональные сочетания физико-механических свойств материала связки и ОМ, а также режимы процесса шлифования с наложением УЗК при которых будут



достигнуты высокая производительность и максимальный коэффициент использования потенциально высоких режущих свойств алмазных зерен.

4. Исследования показали, что с повышением частоты УЗК у абразивных инструментов с низким модулем упругости связки производительность процесса снижается, а в случае использования кругов на связках с более высоким модулем упругости она повышается. Таким образом, использование предложенной методики 3D моделирования вибрационной алмазно-абразивной обработки на базе созданной конечно-элементной модели процесса позволяет подтвердить вывод о том, что вибрационное шлифование дает возможность обеспечивать экономию материальных, энергетических и трудовых ресурсов. Этим подтверждается перспективность этого процесса. В дальнейшем представляется перспективным проведение модельных компьютерных экспериментов на базе предложенной методики применительно к конкретным решаемым задачам в области процессов механической обработки алмазно-абразивными инструментами.

**Список использованных источников:** 1. *Кумабэ Д.* Вибрационное резание. Пер. с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с. 2. *Федорович В.А.* Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Дис...докт. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 2002. – 469 с. 3. *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. 4. *Zaghibani, I.* A thermo-mechanical coupled f.e.m model for orthogonal cutting/ I. Zaghibani , W. Bouzud , K. Sal //Proceedings of the 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. – 2005. – С. 139-145. 5. *Frydryšek K.*: Aplikace pravděpodobnostni metody SBRA ve vědecko-technické 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. 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. – 450с. 7. *Криворучко Д.В.* Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів / Д.В. Криворучко. – Дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / СумГУ. – Суми: СумДУ, 2010. – 453 с. 8. *Козакова Н.В., Федорович В.А.* Оценка влияния размера и концентрации зерен на их целостность при спекании алмазных кругов на металлических связках // Междунар. науч.-техн. сб. «Резание и инструмент в технологических системах», Харьков, НТУ "ХПИ", 2006. Вып. 71. – С. 64-71.