

УДК 621.923

**В.А. Федорович, д.т.н., проф.****В.И. Аносов, аспиp.***Национальный технический университет "ХПИ"*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ БЕЗДЕФЕКТНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ И ШЛИФОВАНИЯ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Разработана подсистема компьютерного определения условий бездефектного изготовления алмазных кругов и шлифования сверхтвердых материалов на базе 3D моделирования напряженно-деформированного состояния элементов системы "кристаллиты СТМ–металлофаза–зерно–связка" в процессе спекания алмазных кругов и шлифования*

**Анализ последних исследований и публикаций.** Сверхтвердые поликристаллические материалы (СТМ) и композиционные сверхтвердые материалы на основе алмаза (КАМ) находят все более широкое применение как в качестве инструментального материала (особенно в прецизионных процессах обработки), так и в качестве конструкционных материалов. Трудоемкость их обработки сопоставима по трудоемкости с процессом обработки природных алмазов.

В настоящее время наиболее технологичным процессом обработки СТМ является их алмазное шлифование. Однако, применяемые в настоящее время процессы алмазного шлифования кругами на органических и металлических связках не решают в полной мере проблемы низкой производительности (которая в 10 000 раз ниже, чем при обработке, например, корундовой керамики), значительного удельного расхода алмазных зерен (достигающего иногда 30 карат зерен на 1 карат снятого припуска) и существенным процентом брака из-за появления сетки микротрещин на обработанной поверхности СТМ. Разработка подсистемы "Defekt", входящей в состав общей экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ, построена по следующему алгоритму:

- трехмерное (3D) моделирование процесса спекания алмазосодержащего слоя для определения условий, при которых сохраняется целостность алмазных зерен;
- определение параметров 3D топографии обрабатываемой поверхности СТМ;
- определение параметров 3D топографии рабочей поверхности

- круга;
- определение фактической площади контакта в системе "РПК-СТМ";
- 3D моделирование термосилового напряженно-деформированного состояния (НДС) системы "СТМ–зерно–связка" (определение условий, исключающих брак из-за растрескивания СТМ);
- расчет интенсивности процесса термоактивируемой доводки обрабатываемой поверхности СТМ.

Задачей процесса 3D моделирования НДС зоны спекания алмазонасного слоя круга на металлической связке является определение оптимального сочетания прочностных свойств алмазных зерен и связки, при которых обеспечивается сохранение целостности алмазных зерен в процессе спекания алмазного круга.

Вопреки существующим представлениям о модели алмазонасного слоя кругов как совершенной нами установлено, что структура алмазного слоя кругов содержит исходную дефектность в виде поврежденных алмазных зерен, которая количественно определяется безразмерной величиной степени повреждения алмазных зерен [1].

В работе Н.В. Новикова [1] установлено, что гранулометрический анализ зерен синтетических алмазов АС50 400/315, извлеченных рекуперацией из образца твесала, показал, что в процессе спекания остаются неразрешенными только около 10–20 % зерен. При этом показано, что на степень повреждаемости алмазных зерен в процессе спекания КАМ существенное влияние оказывает концентрация в них алмазных зерен. Так, увеличение концентрации с 50 до 150 % повышает повреждаемость алмазных зерен в процессе спекания в 2,8 раза.

Поскольку технология спекания алмазонасного слоя круга, например, на твердосплавной связке типа ВК, практически идентичен с технологией спекания композиционных алмазных материалов (КАМ), объективно предположить, что и при спекании алмазных кругов в готовом круге часть зерен разрушается.

Авторы [2] показали, что в процессе спекания алмазных кругов процент основной фракции (крупных зерен) уменьшается на 20–30 %.

Причем алмазные зерна различной прочности, очевидно, будут подвергаться разрушению в процессе спекания по-разному. Безусловно, и состав металлической связки, и как следствие технологические параметры спекания кругов будут существенно сказываться на степени повреждаемости алмазных зерен.

**Изложение основного материала исследования.** Проведенные нами экспериментальные исследования алмазных зерен путем

электрохимического вскрытия нового алмазного круга показали, что часть алмазных зерен разрушаются еще в процессе спекания алмазного круга (рис.1)

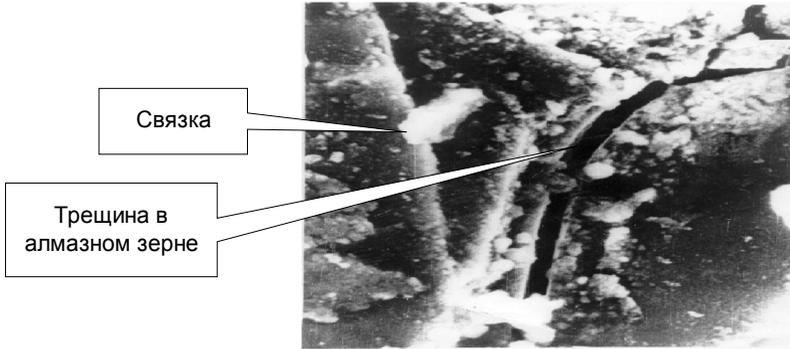


Рис. 1. Алмазное зерно на поверхности неработавшего круга

Процесс спекания алмазных кругов моделировали методом конечных элементов в пакете "Cosmos-M". При 3D моделировании процесса спекания фрагмент алмазоносного слоя круга моделировался кубом с размерами 300x300x300 мкм, с помещенным в центре алмазным зерном в форме октаэдра с размерами 100x100 мкм, что соответствует 100 % концентрации алмазного круга. При моделировании круга с 50 % концентрацией алмазных зерен размер куба увеличивался в два раза и т.д. Металлофаза в алмазном зерне моделировалась в виде прослойки толщиной 5–10 мкм различной формы и длины. Модель нагружалась давлением и температурой, соответствующей реальному процессу спекания алмазных кругов. Алмазное зерно считалось разрушенным, если приведенные напряжения в нем превышали предел его прочности. Моделировался процесс спекания алмазоносного слоя на различных металлических связках от алюминиевых до твердосплавных с различными по прочности алмазными зернами, от AC2 до AC160T.

Результаты 3D моделирования НДС зоны спекания алмазных кругов представлены на рис. 2.

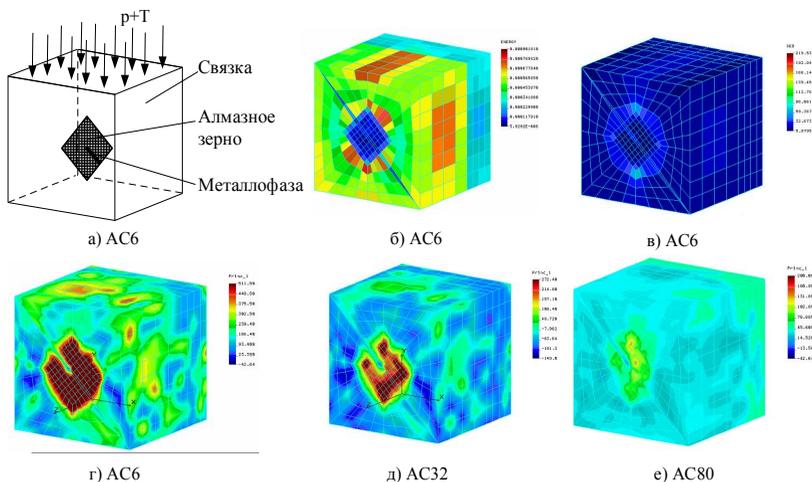


Рис. 2. Влияние марки алмазного зерна на 3D НДС системы «алмазное зерно–связка»: спекаемая композиция – связка М2-09, зернистость 200/160; а, б, в – напряжения, г – энергия деформации, д – плотность энергии деформации

Путем варьирования сочетанием прочности алмазных зерен и их концентрации в круге для различных металлических связок определялось такое их сочетание, при котором обеспечивалось сохранение целостности алмазных зерен, т.е. они не должны разрушаться в процессе спекания. Установлено, что далеко не все серийно выпускаемые круги с используемым сочетанием марок алмазных зерен и металлических связок могут быть изготовлены со стандартной концентрацией алмазных зерен без нарушения их целостности. Так, например, при спекании круга на связке М6-14 с алмазными зернами марки АС6 концентрация их в круге не должна превышать 7 %, в противном случае они будут разрушаться уже в процессе изготовления круга. Показано, что для гарантийного сохранения целостности алмазных зерен практически во всех серийно выпускаемых кругах их концентрация должна быть существенно меньше применяемой. Такая тенденция хорошо увязывается с возможностью и необходимостью снижения концентрации алмазных зерен в круге до уровня 10–15 % при шлифовании сверхтвердых материалов [3].

Установлено, что для сохранения целостности алмазных зерен в процессе спекания круга должны быть строго соблюдены сочетания марки алмазных зерен и марки металлической связки. Анализ

результатов теоретических расчетов позволил определить составы алмазно-металлических композиций, обеспечивающие целостность зерен в круге в процессе его изготовления (табл. 1).

Таблица 1

*Рекомендуемые для спекания  
составы алмазно-металлических композиций*

Марка зерна	Модуль упругости связки, ГПа	Зернистость, мкм	Концентрация, %
АС2	40-52	50/40-63/50	5-7
АС4	44-70	50/40-80/63	5-10
АС6	77-95	50/40-100/80	10-16
АС15	86-100	80/63-100/80	15-21
АС32	98-110	80/63-125/100	18-25
АС50	102-119	100/80-160/125	25-28
АС80	143-173	125/100-50/200	25-34
АС100	165-210	125/100-15/250	30-37
АС125	190-260	200/160-15/250	30-40
АС160	210-320	250/200-00/400	35-45

Таким образом, на первом этапе исследований установлены оптимальные сочетания прочностей металлической связки и алмазных зерен с предельно допустимой концентрацией их в круге, обеспечивающие сохранение их целостности в процессе изготовления алмазных кругов. Полученные на первом этапе оптимальные соотношения прочностей связки, алмазных зерен и их концентрация являются лишь ограничивающими параметрами и должны быть уточнены для процесса алмазного шлифования в зависимости от прочностных свойств обрабатываемого материала.

После получения установленных ограничений определяем оптимальное сочетание прочности обрабатываемого материала, связки, алмазных зерен и их концентрации в круге, обеспечивающее максимальную эффективность процесса шлифования. В процессе эксплуатации оптимальное сочетание прочностей связки, алмазных зерен и их концентрации определяем в зависимости от прочностных свойств ОМ. Для этого также используется методология 3D моделирования НДС, только для зоны шлифования.

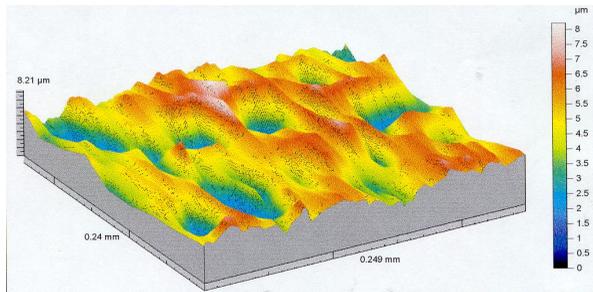
Параметры 3D топографии РПК изучали на лазерном сканирующем приборе "Perthometer S8P" с лазерным датчиком модели FOCODYN, диапазон вертикального разрешения которого составлял  $\pm 250$  мкм, что вполне достаточно для измерения высотных параметров РПК кругов зернистостью до 630/500. Прибор позволяет одновременно фиксировать 9 выбранных из 86 возможных параметров топографии

РПК. Для оценки топографии субмикрорельефа алмазных зерен шаг сканирования рабочей поверхности круга принимали равным 1 мкм, т.е. по каждому алмазному зерну луч проходил несколько десятков раз [4].

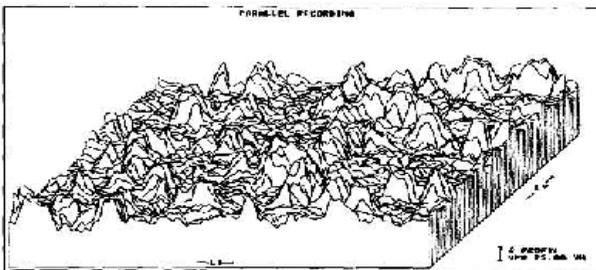
Определение параметров 3D топографии обрабатываемой поверхности СТМ производили на профилографе фирмы "Hammelwerke" модели "Turbo Roughness V3.32" с радиусом иглы 2 мкм.

Примеры 3D топографии поверхности СТМ и РПК приведены на рис. 3.

При экспериментальном определении фактической площади контакта в системе "СТМ–РПК" использованы результаты изучения параметра относительной опорной площади профиля  $t_{ps}$  [5]. Поскольку при алмазном шлифовании СТМ твердость обрабатываемого материала практически равна (без учета анизотропии свойств кристаллитов алмаза) твердости алмазных зерен и их внедрение в обрабатываемый материал бесконечно мало, измерение параметра  $t_{ps}$  осуществляли только на уровне 0.1–1 мкм от линии выступов.



а)



б)

Рис. 3. 3D топография поверхности  
а) РПК; б) СТМ.

В качестве фактической площади контакта ( $A_r$ ) принимали среднее значение параметров  $t_{ps}$  для РПК и СТМ.

$$A_r = \frac{t_{ps}^{РПК} + t_{ps}^{СТМ}}{2}.$$

Теоретические расчеты фактической площади контакта в системе "РПК–СТМ" производились нами с использованием зависимостей Н.Б. Демкина и И.В. Крагельского [5]. Определив фактическую площадь контакта, переходим к моделированию напряженно-деформированного состояния (НДС) в системе "СТМ–зерно–связка". Поскольку существует мнение [6], что причиной разрушения СТМ может являться существенное различие в коэффициентах термического расширения (КТР) алмаза и металлофазы СТМ, исследовали НДС изучаемой системы. Теоретический анализ термосилового НДС системы "Кристаллиты–металлофаза–зерно–связка" методом конечных элементов (МКЭ) осуществлялся в пакете программного комплекса типа "Cosmos" с применением восьми узловых элементов SOLID (1847 узлов, 1640 элементов). Пакет позволяет решать задачу в трехмерном измерении (3D моделирование), что выгодно отличает данную методику от применяемой ранее другими авторами [7], [8]. СТМ моделировали в виде совокупности кристаллитов кубической формы размерами 0,2×0,2×0,2 мм с произвольно размещенными в нем прослойками металлофазы размерами 20×200×200 мкм. Расчетная схема взаимодействия элементов системы моделирует наиболее неблагоприятный вариант шлифования при массовом образовании площадок износа на алмазных зернах. Расчетная схема модели и 3D напряжения в системе "СТМ–зерно" представлены на рис. 4

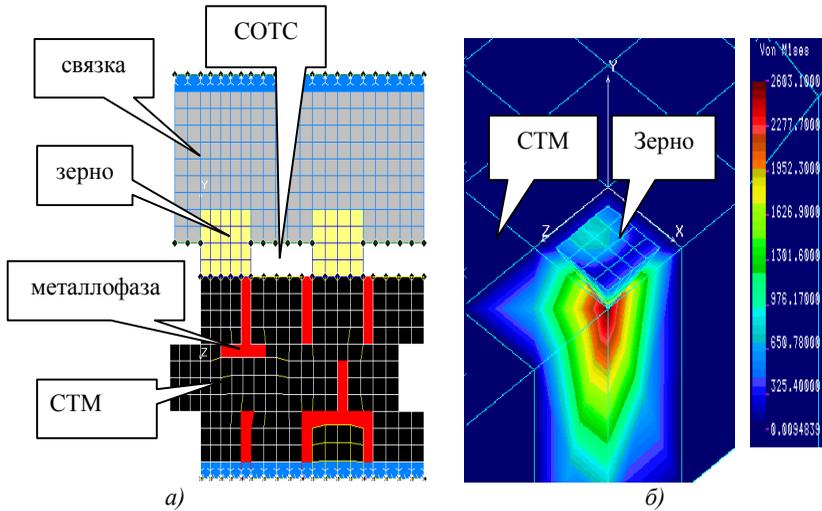
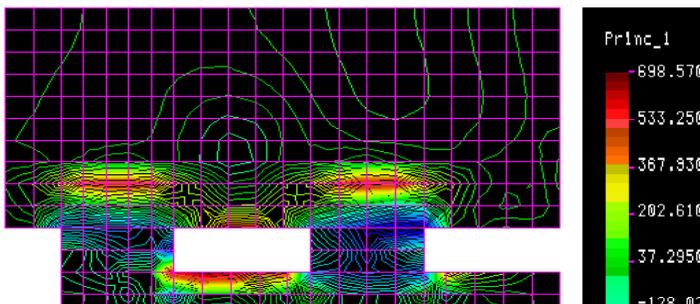


Рис. 4. Конечноэлементная расчетная схема взаимодействия системы "Кристаллиты СТС–металлофаза–зерно–связка" (а) и приведенные 3D напряжения в зерно и СТС (б)

Достоинством данной методики является возможность в объемном варианте (3D модель) оценить отдельно влияние поперечной подачи ( $S_{\text{поп}}$ ), величины нормального давления в контакте "РПК-СТС" ( $P_n$ ), физико-механических свойств СТС, алмазных зерен и связки, температуры в зоне шлифования (в контакте "Зерно–СТС"), температуры СОЖ (или ее отсутствие) на температурные поля, величину главных и приведенных напряжений, вызванных как отдельно силовыми и температурными факторами, так и их суммарным воздействием (термосиловые напряжения). Пакет позволяет также оценивать энергию деформации, по которой легко можно, пользуясь теорией Гриффитца, определять возможность образования и развития микротрещин как на поверхности СТС и алмазных зерен (если они поликристаллические), так и развития внутренних микротрещин.

Пример результатов моделирования НДС в системе "Кристаллиты СТС–металлофаза–зерно–связка" приведен на рис. 5.



*Рис. 5. Результаты расчета 3D-модели температурных и термосиловых полей напряжений в системе "Кристаллиты СТМ–металлофаза–зерно–связка"*

Достоинством данной методики расчета является трехмерное (3D) решение задачи, получение трехмерных температурных полей, трехмерных полей приведенных и главных температурных и термосиловых напряжений в зерне, связке, металлофазе и поликристалле.

Возможность определения главных и приведенных термосиловых напряжений, а также энергии деформирования в любой точке системы "Кристаллиты СТМ–металлофаза–зерно–связка" позволяет использовать как энергетический, так и силовой критерии хрупкого разрушения материалов. Используя, например, методику компьютерного метода конечных элементов для прогнозирования развития дефектного слоя при моделировании НДС обрабатываемой поверхности [8], но, учитывая при этом еще и температурный фактор, можно анализировать влияние физико-механических свойств элементов системы, режимов шлифования и характеристик кругов на вероятность бездефектной обработки различных марок СТМ, в том числе и вновь создаваемых.

Из проведенных расчетов определяем условия шлифования ( $S_{non}$ ,  $P_n$ , число зерен в контакте, характеристики круга, наличие СОЖ), при которых исключается вероятность образования дефектного слоя, т.е. брака при заточке инструмента из СТМ.

Разработанная подсистема "Defekt" позволяет анализировать не только условия бездефектной обработки СТМ, но и как подсистема общей теоретической экспертной системы позволяет оптимизировать процесс съема припуска с учетом температурного фактора, как это

сделано, например, в работе [9], применительно к шлифованию ситаллов.

На следующем этапе разработки подсистемы "Термо" оцениваем возможность осуществления термоактивируемой доводки обрабатываемой поверхности СТМ.

Поскольку эффективность применения лезвийного инструмента из СТМ во многом определяется качеством его заточки, т.е. шероховатостью граней и режущих кромок, что требует проведение отдельных доводочных операций, оценили возможность осуществлять их тем же крупнозернистым кругом на металлической связке.

Процесс доводки осуществляем при выключенной системе управления режущим рельефом кругов [10], т.е. при условии массового образования на зернах площадок износа с выключенной подачей СОЖ.

Интенсивность термоактивируемой доводки рассчитывали, используя зависимость Г.П. Черепанова [11] по методу "огневого бурения". Результаты расчетов приведены в работе [12]. Для нашего случая важно максимально точно определить величину фактической площади контакта, которая оценивалась при 3D лазерном сканировании поверхностей СТМ и РПК. Расчеты показали, что даже при щадящих режимах термодоводки за 1–2 минуты с поверхности СТМ может быть снят объем материала, находящийся в пределах шероховатости предварительно обработанной поверхности. Объем материала, составляющего шероховатость предварительно обработанной поверхности СТМ, определялся путем лазерного компьютерного сканирования поверхности [4].

С целью интенсификации процесса термоактивируемой доводки выдвинута следующая гипотеза. Если использовать металлическую связку на основе железа (МЖ), то, во-первых, решается проблема максимально прочного удержания алмазных зерен; во-вторых, можно использовать присущие алмазным СТМ свойства – высокая степень сродства с черными металлами и, как следствие, высокая интенсивность износа резцов из алмазных СТМ при обработке таких материалов. В нашем случае при выключенной системе управления параметрами РПК [10] металлическая (железная) связка, находясь в контакте с алмазом в условиях высоких давления и температуры, будет способствовать диффузионному съему микронеровностей с обрабатываемой поверхности СТМ.

**Выводы.** Таким образом, появляется возможность осуществлять предварительную (с выключенной системой управления режущим рельефом круга) и прецизионную (доводочную – с выключенной системой управления режущим рельефом круга) операции обработки

СТМ одним и тем же крупнозернистым кругом на прочной металлической связке.

Разработанная подсистема теоретической экспертной системы алмазного шлифования СТМ позволяет определять условия бездефектного изготовления алмазных кругов и бездефектной обработки СТМ при термоактивируемой доводки лезвийных инструментов из сверхтвердых материалов на основе алмаза.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н.* Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1993. – 220 с.

2. *Кизиков Э.Д., Верник Е.Б., Кошевой Н.С.* Алмазно-металлические композиции. – К.: Техніка, 1988. – 136 с

3. *Федорович В.А.* Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Дис... докт. техн. наук: 05.03.01. – Х., 2002. – 469 с.

4. *Федорович В.А., Русанов В.В., Кавалец М., Янковяк М.* Новые возможности изучения параметров режущего рельефа алмазных кругов // Высокие технологии, развитие и кадровое обеспечение. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2001. – С. 214–222.

5. *Федорович В.А., Гринько С.А.* Определение фактической площади контакта РПК с обрабатываемым СТМ // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць ХДПУ. – Харків, 2000. – С. 266–272.

6. *Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н.* Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1993. – 220 с.

7. *Новиков Н.В., Воронин Г.А.* Расчет напряженно-деформированного состояния кристаллов синтетических алмазов методом конечных элементов. // Сверхтвердые материалы. – 1983. № 1. – С. 13–16.

8. *Калафатова Л.П.* Технологические основы повышения эффективности обработки и обеспечения качества изделий из технических стекол и ситаллов: Дисс. докт. техн. наук: 05.02.08. – Донецк: ДГТУ, 2001. – 442 с.

9. *Бурмистров В.В.* Научные основы надежности технологических систем алмазно-абразивной обработки технической керамики и ситаллов. – Самара: Изд. Диамант–Феникс. 2001. – 122 с.

10. Федорович В.А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов. – Харьков // Вестник ХГПУ. – 1999. – Вып. 45. – С. 26–28.

11. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

12. Федорович В.А., Русанов В.В., Федорович Н.В., Янкавяк М. Экспертная система процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Выпуск 7. – Харьков, 2001. – С. 255–260.

ФЕДОРОВИЧ Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры "Резание материалов и режущие инструменты" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт".

Научные интересы:

- процессы абразивной обработки;
- технология машиностроения.

АНОСОВ Валерий Иванович – аспирант кафедры "Резание материалов и режущие инструменты" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт".

Научные интересы:

- процессы абразивной обработки;
- технология машиностроения.

Подано 05.09.2005

The method 3D of modeling a voltage-deformed condition of system "SHM-a grain-binding" at diamond grinding determined conditions without defective processing. The opportunity of realization preliminary and precision of processing SHPM same largely to granular circle on metal binding is proved.

Национальный Технический Университет  
«Харьковский Политехнический Институт»

Федорович  
Владимир Алексеевич  
профессор, доктор технических наук, профессор  
кафедры «Резание материалов и режущие инструменты»

Украина, 61002, Харьков, Фрунзе, 21  
тел/факс: (+38) (057) 7064143  
e-mail: fedorovich@kpi.kharkov.ua