

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

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ШЛИФОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**Аннотация.** *Приведены результаты моделирования процесса вибрационного алмазного шлифования поликристаллических сверхтвердых материалов на основе алмаза и плотных модификаций нитрида бора. На настоящее время алмазное шлифование кругами на различных связках является одним из наиболее распространенных методов формообразования изделий (в том числе и режущих инструментов) из поликристаллических сверхтвердых материалов. Съем припуска с обрабатываемого материала осуществляется при этом путем его хрупкого микроразрушения при высокоскоростном контактном взаимодействии с острыми микро – и субмикроромками кромками алмазных зерен. Таким образом, основной предпосылкой для реализации такого процесса является наличие на зернах острых микро – и субмикроромок, что достигается путем создания предпосылок иницирующих процесс непрерывного самозатачивания зерен при алмажном шлифовании. В настоящее время для оптимизации затрат на научные исследования значительную перспективу имеет оптимальное сочетание станочных и модельных экспериментов. При рассмотрении возможных вариантов САD-систем был сделан вывод, что для моделирования вибрационного шлифования наиболее подходящим является пакет SolidWorks, содержащий плагин Simulation, базирующийся на методе конечных элементов. Установлено, что наложение механических колебаний (вибраций) в зону обработки существенно увеличивает напряженно-деформированное состояние в зоне контакта алмазного зерна с обрабатываемым материалом при шлифовании. Это является положительным моментом в плане активации процесса самозатачивания алмазных зерен путем их микро- и макроразрушения. Установлено также, что в случае введения в зону обработки механических колебаний напряжения равномерно распределяются вдоль всего зерна, что в свою очередь улучшает его удержание в связке, а, следовательно, способствует более полному использованию ресурса алмазных зерен. В конечном счете, это приводит к повышению эффективности процесса шлифования за счет увеличения производительности обработки и снижения удельного расхода алмазов круга.*

**Ключевые слова:** *поликристаллические сверхтвердые материалы, алмазные зерна круга, связка круга, самозатачивание зерен, нормальная и тангенциальная составляющие силы резания, периодичность процесса шлифования, вибрационное шлифование, напряженно-деформированное состояние, эквивалентные напряжения, планирование эксперимента.*

**Постановка проблемы.** Уникальные физико-механические свойства поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) к которым в первую очередь относятся синтетические поликристаллические алмазы (СПА) и плотные модификации нитрида бора (ПТНБ) позволили им сразу же найти возможность широкого использования во многих областях народного хозяйства. Отмеченные выше материалы составляют особую группу обрабатываемых материалов (ОМ). Технологии их производства постоянно совершенствуются. В тоже время существует серьезная проблема обработки ПСТМ.

Затраты на изготовление инструментов из них достаточно велики, так как наука и техника пока не располагают абразивными материалами, твердость которых превышала бы твердость алмаза на необходимую с точки зрения эффективности процесса резания величину. На настоящее время одним из наиболее распространенных методов формообразования изделий (в том числе и режущих инструментов) из ПСТМ является алмазное шлифование кругами на различных связках. Съем припуска с ПСТМ осуществляется при этом путем хрупкого микроразрушения ОМ при высокоскоростном контактном взаимодействии алмазных зерен с ОМ. Основной предпосылкой для реализации такого процесса является наличие на зернах острых микро- и субмикроромок [1]. Отсутствие представлений об особенностях механизма самозатачивания алмазных зерен в кругах не позволяет вскрыть их возможные потенциальные резервы при обработке ПСТМ.

Одним их эффективных методов активизации процесса самозатачивания алмазных зерен путем их макро- и микроразрушения с образованием на их поверхности микро- и субмикроромок является введение в зону шлифования вибраций [2]. В связи с этим нами предпринята попытка установления физических особенностей в зоне контакта алмазных зерен с ПСТМ путем изучения влияния различных факторов на величину эквивалентных напряжений, что позволит судить о возможности самозатачивания алмазных зерен. В конечном итоге это должно позволить установить пути повышения эффективности рассматриваемого процесса обработки. В частности, вибрации являются инструментом, с помощью которого можно не просто исключить такое отрицательное явление при обработке ПСТМ как периодичность самозатачивания круга (что снижает производительность и повышает расход алмазных зерен круга) [3], но и обеспечить самозатачивание зерен с меньшей высотой выступания над связкой круга, а, следовательно, при большем их количестве в контакте с ПСТМ. По нашему мнению в этом состоит резерв процесса шлифования ПСТМ.

**2. Анализ последних исследований и публикаций.** Известно, что экспериментальное (станочное) изучение особенностей ультразвуковой алмазно-абразивной обработки является дорогостоящим и трудоемким процессом. В связи с этим очевидно, что использование «вычислительного эксперимента» является актуальным альтернативным методом исследования вибрационного шлифования [4], [5].

При рассмотрении возможных вариантов САД-систем был сделан вывод, что наиболее подходящим для моделирования вибрационного шлифования является пакет SolidWorks, содержащий плагин Simulation, базирующийся на методе конечных элементов (МКЭ).

**3. Цель исследования.** Установление физических особенностей в зоне контакта алмазных зерен с ПСТМ путем изучения влияния различных факторов на величину эквивалентных напряжений.

**4. Основные материалы исследования.** Для изучения процесса вибрационного шлифования необходимо определить влияние ультразвуковых колебаний, вводимых в зону шлифования, на напряженно-деформированное состояние (НДС) системы «связка – алмазное зерно – металлофаза – обрабатываемый материал».

Известно, что наиболее распространенной формой кристаллитов (монокристаллов) алмаза считается октаэдр, поскольку при разрушении алмаза частицы (продукты разрушения) имеют, как правило, именно форму октаэдра [4]. Форму модели зерна в МКЭ принимали близкой к нему, таким образом, было выбрано тело, в продольном сечении которого лежит восьмигранник.

Фрагменты связки и обрабатываемого материала были представлены в виде призматических пластин с размерами соответственно 0,4×0,4×0,4 мм и 0,4×0,4×0,2 мм, что позволяло достаточно точно моделировать деформирование фрагментов модели с учетом удаленности зон краевых эффектов. Металлофаза в алмазном зерне моделировалась в виде прослойки толщиной 2 – 5 мкм различной формы и длины (рис. 1).

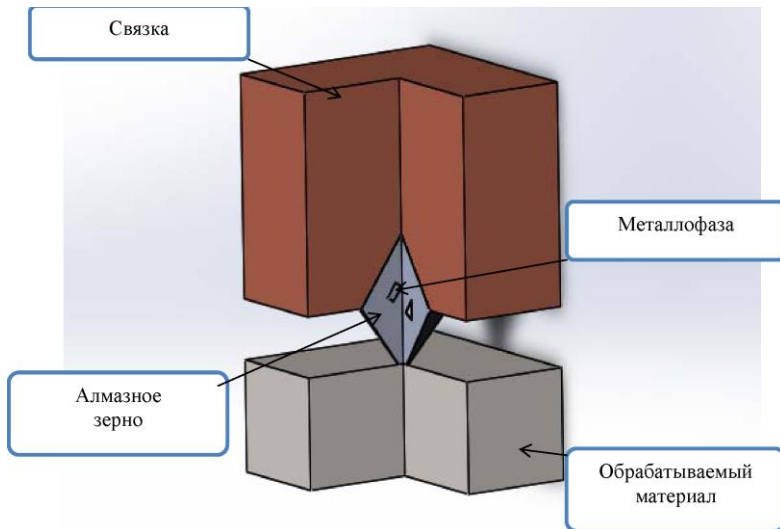


Рисунок 1 – Исходная 3D-модель системы «связка – алмазное зерно – металлофаза – обрабатываемый материал»

Наличие металлофазы в алмазных зернах, коэффициент термического расширения которой больше чем у алмаза, приводит к тому, что при нагреве это может вызвать растрескивание зерна в местах ее расположения. Процесс шлифования кругами на различных связках характеризуется высокими температурами в зоне резания. В связи с этим логично предположить, что это будет оказывать существенное влияние на разрушение алмазных зерен.

На следующем этапе производилось создание сетки конечных элементов и ее сгущение в области контакта алмазного зерна с обрабатываемым материалом. Принималось, что связка круга – на основе меди, обрабатываемый материал – поликристаллический сверхтвердый материал (ПСТМ), металлофаза – никель. В качестве материала зерна выбран алмаз марки АС100 зернистостью 160/125, обладающий следующими прочностными характеристиками:  $\sigma_{\text{раст}} = 2,18$  ГПа;  $\sigma_{\text{сж}} = 12,9$  ГПа [5] [6].

Следующим этапом моделирования было задание параметров нагружения модели. В ходе эксперимента модель нагружалась распределенной нагрузкой, приложенной к верхней грани связки (моделировалась нормальная составляющая силы резания  $P_y$ ) и равномерной нагрузкой, приложенной к боковой грани имитирующей тангенциальную составляющую силы резания  $P_z$  (рис. 2).

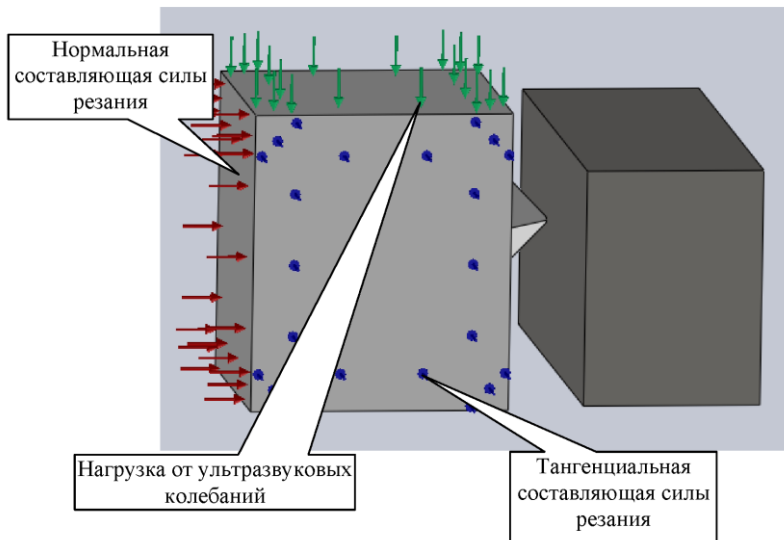


Рисунок 2 – Задание нагрузки при шлифовании с наложением ультразвуковых колебаний

Моделювання вібраційного шліфування вироблялось путем варіювання зусилля прижима алмазного шліфувального круга со временем. Для цього зусилля прижима задавалось в виде гармонической нагрукки, график которой имел вид синусоиды (рис. 3) с частотой  $10 \div 50$  кГц и амплитудой равной приложенной нагрукке.

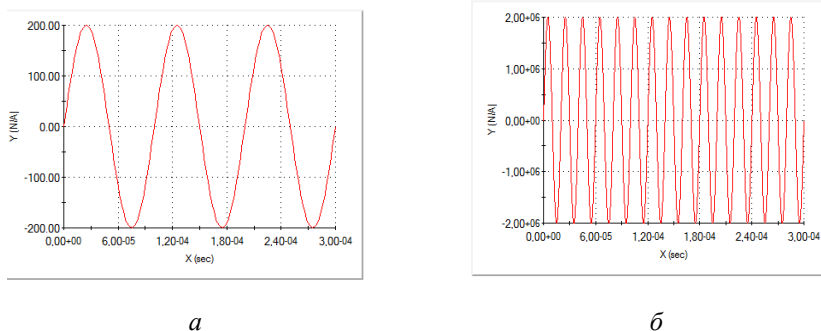


Рисунок 3 – График гармонической нагрукки амплитудой 2 МПа:  
а –  $f = 10$  кГц; б –  $f = 50$  кГц

Влияние ультразвуковых колебаний на НДС в зоне контакта «зерно-связка». Основной причиной высокой себестоимости процесса алмазного шліфування, 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. В связи с этим была поставлена задача изучения НДС в зоне контакта «зерно-связка» при ультразвуковом шліфуванні путем 3D моделирования. Было проведено сравнение состояния зоны контакта «зерно – связка» при шліфуванні традиционным методом и при обработке с наложением колебаний.

Расчеты НДС зоны контакта «зерно – связка» показали, что в случае наложение ультразвуковых колебаний напряжения равномерно распределяются вдоль всего зерна, что должно улучшать его удержание в связке (рис. 4). При моделировании шліфування без вибраційных колебаний, максимальные напряжения концентрируются на определенной грани алмазного зерна. Это может послужить разрушению зерна в зоне контакта со связкой и его последующему выпадению. При этом установлено, что при вибраційном шліфуванні напряжения в контакте «зерно-связка» на 40% (рис. 4) меньше чем при традиционном шліфуванні, что положительно сказывается на удержании зерна в связке.

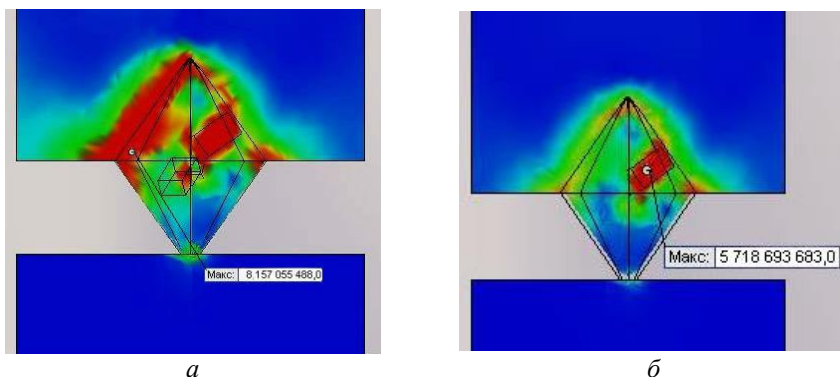


Рисунок 4 – Распределение эквивалентных напряжений в контакте «зерно – связка» при шлифовании без ультразвука (а) и с ультразвуком (б)

Во второй части эксперимента исследовалось влияние частоты вибрационных колебаний на производительность обработки. Для этого эксперимента было проведено два расчёта, в ходе которых значение частоты ультразвуковых колебаний варьировалось. В первом случае на модель накладывались колебания частотой 20 кГц, во втором – 50 кГц. Результаты расчёта НДС зоны резания представлены на рисунке 5. Они показали, что с ростом частоты ультразвуковых колебаний НДС в зоне резания увеличивается. Это свидетельствует о том, что путем варьирования значением частоты ультразвуковых колебаний можно регулировать объём снимаемого материала в единицу времени, т.е. изменять производительность обработки.

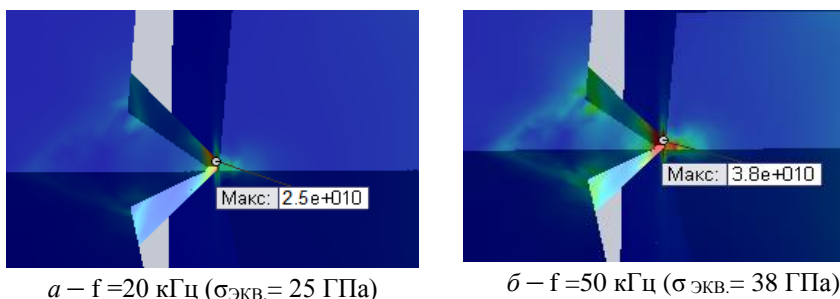


Рисунок 5 – Распределение эквивалентных напряжений при изменении частоты колебаний вибрационного шлифования

*Математическое моделирование шлифования с наложением высокочастотных колебаний методом многофакторного планирования эксперимента.* Для сокращения количества расчетов и получения математической модели процесса ультразвукового шлифования применили метод многофакторного планирования расчетного эксперимента с использованием плана В4.

В качестве факторов были приняты: частота колебаний, модуль упругости связки, коэффициент термического расширения (КТР) металлофазы и процентное содержание металлофазы в алмазном зерне. Обработываемым материалом являлся ПСТМ. Выбор интервала варьирования не является формализованной процедурой, а зависит от интуиции исследователя, поэтому будем принимать значения уровней факторов, указанные в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов

Уровни факторов	Фактор							
	Частота колебаний		Модуль упругости связки		КТР металлофазы		Количество включений металлофазы	
	Натуральное значение, Гц	Кодированное значение $X_1$	Натуральное значение, Н/м <sup>2</sup>	Кодированное значение $X_2$	Натуральное значение, 1/К	Кодированное значение $X_3$	Натуральное значение, шт.	Кодированное значение $X_4$
Верхний	50e+003	+1	1,45e+011	+1	2,1e-005	+1	3	+1
Основной	30e+003	0	1,1e+011	0	1,7e-005	0	2	0
Нижний	10e+003	-1	0,75e+011	-1	1,3e-005	-1	1	-1

Согласно матрице планирования плана В4 было проведено 24 расчетных экспериментов в соответствии с выбранными факторами.

На рис. 6 представлена визуализация результатов моделирования по влиянию выбранных факторов на НДС зоны шлифования. После обработки

результатов расчетов в программном пакете Maple 14 было получено уравнение регрессии, устанавливающее математическую зависимость между основными влияющими факторами и напряжениями в зоне шлифования:

$$Y = 9,267 - 0,394X_1 + 0,659X_2 + 0,984X_3 + 2,529X_4 - 1,098X_1X_2 + 0,082X_1X_3 - 0,543X_1X_4 - 0,416X_2X_3 + 0,13X_2X_4 + 0,468X_3X_4 - 0,016X_1^2 + 2,08X_2^2 - 2,07X_3^2 - 1,57X_4^2 \quad (1)$$

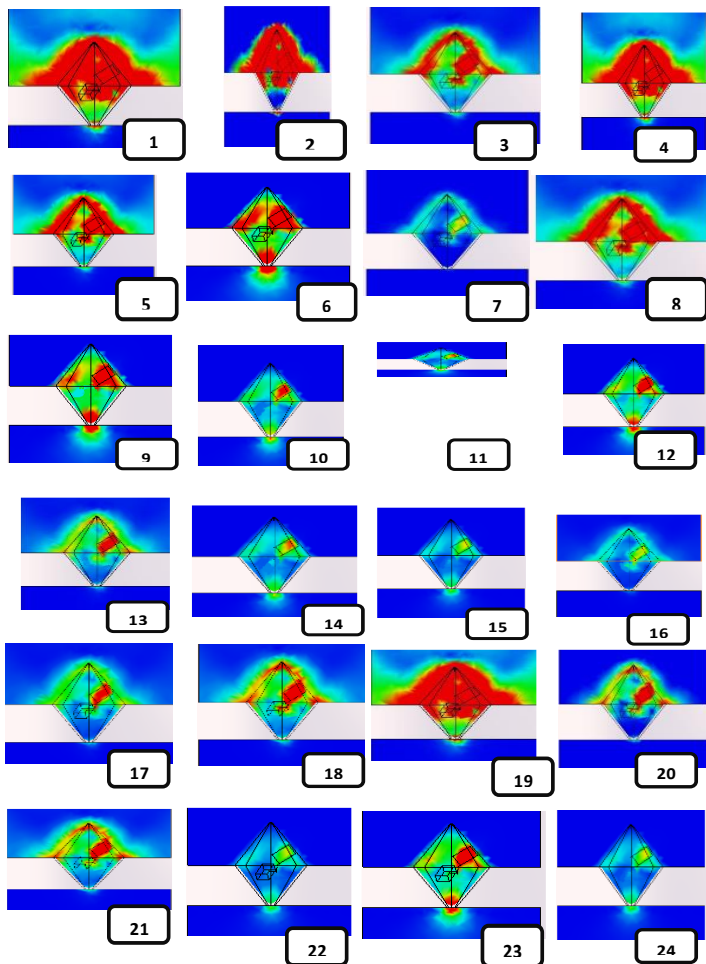


Рисунок 6 – Визуализация результатов моделирования по влиянию выбранных факторов на НДС зоны шлифования



По результатам эксперимента были построены одномерные зависимости напряжения от частоты при различных значениях модуля упругости обрабатываемого материала, представленные на рис. 7 – 12.

Эти зависимости показывают, что значения напряжений могут достигать такой величины, при которой в процессе шлифования будет реализовываться наиболее производительный метод обработки, обеспечивающий максимальный коэффициент использования потенциально высоких режущих свойств алмазных зерен.

Графики зависимости  $\sigma_{\text{экв}}$  от частоты вибрационных колебаний при различных модулях упругости связки свидетельствуют о том, что с повышением частоты колебаний у инструментов с низким модулем упругости связки (рис. 7) напряжения снижаются. У инструментов с более высокой упругостью связки  $\sigma_{\text{экв}}$  возрастают, что, как показывают станочные эксперименты, приводит к росту производительности шлифования. Это можно объяснить тем, что распространяющиеся в любой среде упругие волны испытывают поглощение, обусловленное вязкостью (силами внутреннего трения), теплопроводностью, а на высоких частотах и молекулярным поглощением в среде. [2]

На рис. 9 представлены зависимости напряжений, возникающих в системе «связка – алмазное зерно – металлофаза – обрабатываемый материал» от модуля упругости связки при изменении КТР металлофазы и оптимальная зона напряжений (рис.10).

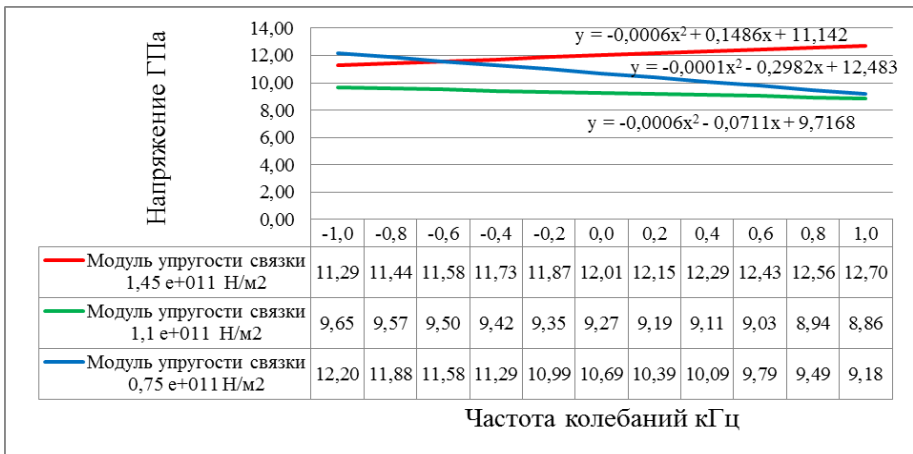


Рисунок 7 – Зависимость  $\sigma_{\text{экв}}$  от частоты вибрационных колебаний при изменении модуля упругости связки алмазного круга

Двумерные сечения поверхности отклика дают графическое представление об оптимальной зоне шлифования (рис. 8).

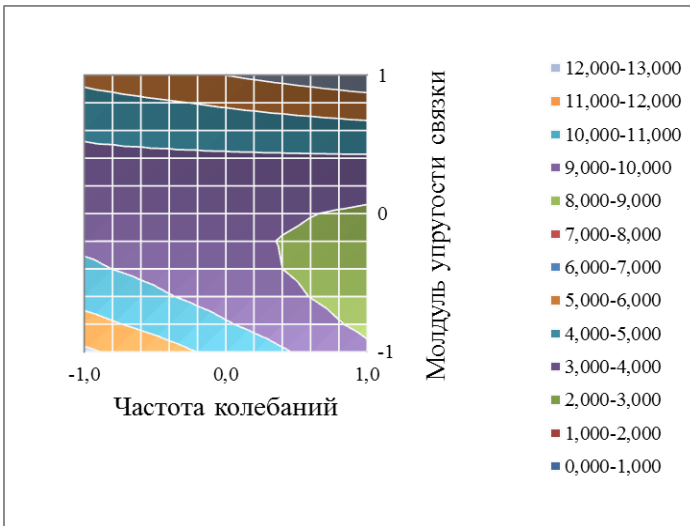


Рисунок 8 – Визуализация зависимости значения  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  от частоты колебаний и модуля упругости связки

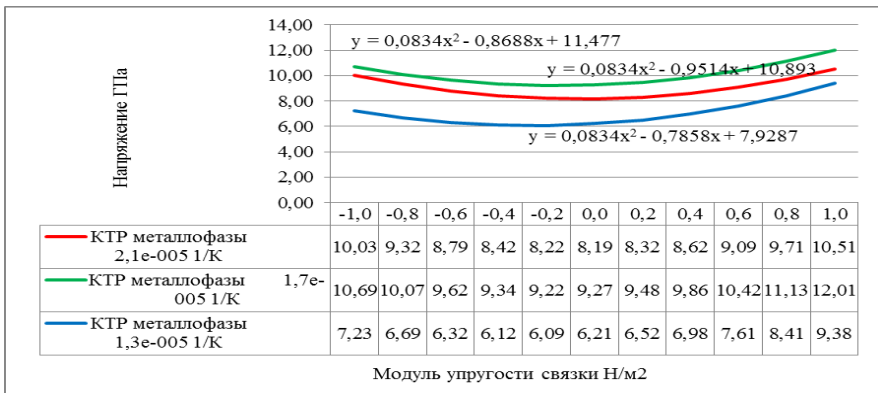


Рисунок 9– Зависимость  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  от модуля упругости связки при изменении КТР металлофазы

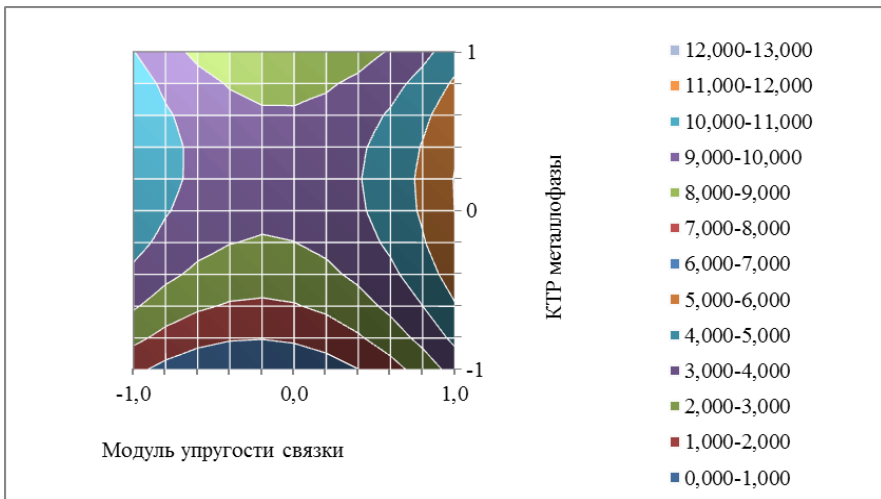


Рисунок 10 – Визуалізація залежності значення  $\sigma_{\text{экв}}$  від модуля епругости зв'язки при зміні КТП металлофазы

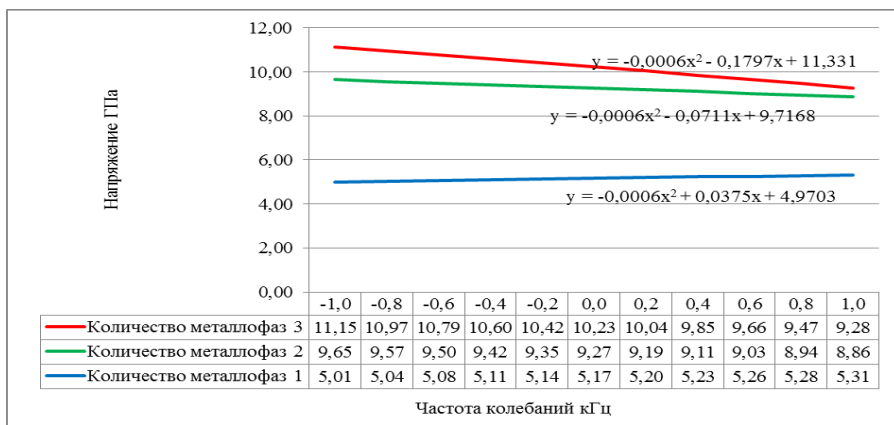


Рисунок 11 – Залежність  $\sigma_{\text{экв}}$  від частоти коливань при варіюванні кількості металлофаз

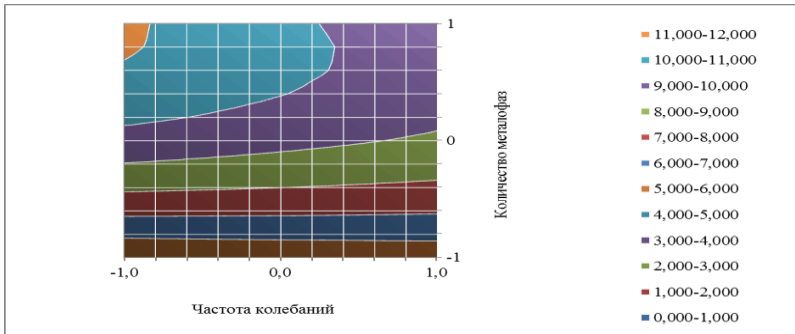


Рисунок 12 – Визуалізація залежності значення  $\sigma_{\text{экв}}$  від частоти коливань і кількості металлофазы

*Оптимізація процесу ультразвукового шліфування.* Оптимізація процесу ультразвукового шліфування проведена в програмному пакеті Maple 14. В результаті були установлені оптимальні значення факторів ( $X_{1\text{опт}}=-1$ ;  $X_{2\text{опт}}=1$ ;  $X_{3\text{опт}}=0,23$ ;  $X_{4\text{опт}}=-1$ ) при яких максимальне напруження становить  $Y_{\text{max}}=8,64$  ГПа. Переводячи ці дані в реальні значення отримимо, що оптимальне значення частоти коливань становить 10 кГц, модуль еластичності зв'язки  $6,9e+011$  Н/м<sup>2</sup>, КТР металлофазы  $2,1e-005$  1/К, оптимальне кількість металлофазы повинно становити 1, що відповідає 3% металлофазы в алмазному зерні.

Візуалізація оптимального значення напружень приведена на рис. 13 – 14.

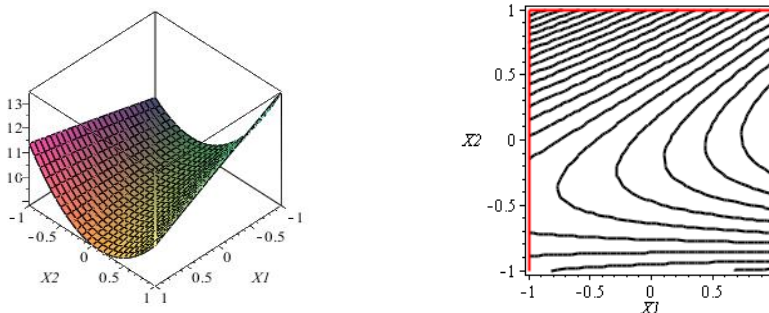


Рисунок 13 – Залежність максимальних напружень від частоти коливань ( $X_1$ ) і модуля еластичності зв'язки ( $X_2$ )

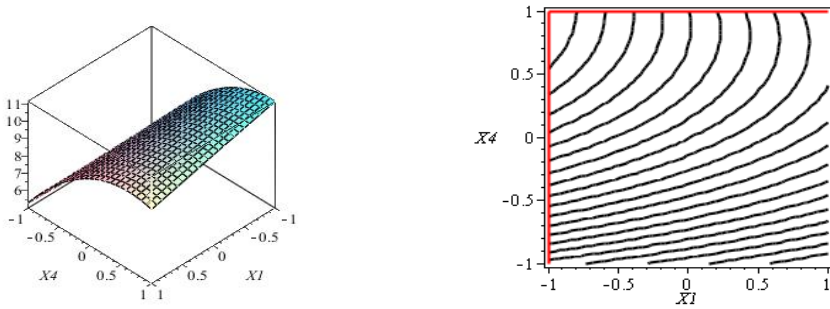


Рисунок 14 – Зависимость максимальных напряжений от частоты колебаний ( $X_1$ ) и количества металлофазы в зерне ( $X_4$ )

**Выводы и перспективы развития.** 3D моделирование НДС системы «алмазное зерно – ПСТМ» подтвердило возможность активации процесса самозатачивания алмазных зерен, а, следовательно, и повышения производительности шлифования ПСТМ. При шлифовании без вибрационных колебаний, максимальная нагрузка концентрируется на определенной грани алмазного зерна. Это может послужить разрушению зерна в зоне контакта со связкой и его последующему выпадению. Установлено, что в случае введения в зону обработки вибраций напряжения равномерно распределяются вдоль всего зерна, что в свою очередь улучшает его удержание в связке. В целом это будет способствовать снижению удельного расхода алмазов круга.

**Список использованных источников:** 1. *Семко М.Ф.* Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / *М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, М.Г. Ходоревский* - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. 2. *Шутилов В. А.* Основы физики ультразвука / *В.А. Шутилов*. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1980. – 280 с. 3. *Грабченко А.И.* Повышение режущей способности токопроводящих алмазных кругов в комбинированных процессах шлифования ПСТМ / *А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, Д.М. Алексеенко*. Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки», №1, т.1, 2011.-С. 105-116. 4. *Грабченко А.И.* 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: Учебное пособие / *А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович*. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с. 5. *Федорович В. А.* Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов. – Дис. доктора технических наук: 05.03.01. – Харьков, 2003. – 469 с. 6. *Козакова Н. В.* Определение оптимальных характеристик алмазных кругов путем 3D моделирования процессов их изготовления и шлифования сверхтвердых материалов: Дис. канд. техн. наук: 05.03.01. –

Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – 210 с.

Володимир Федорович, Іван Піжов,  
Ірина Волошкіна, Харків, Україна

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІБРАЦІЙНОГО ШЛІФУВАННЯ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

**Анотація.** *Наведені результати моделювання процесу вібраційного алмазного шліфування полікристалічних надтвердих матеріалів на основі алмазу і щільних модифікацій нітриду бору. На даний час алмазне шліфування кругами на різних зв'язках є одним з найбільш поширених методів формування виробів (в тому числі і ріжучих інструментів) з полікристалічних надтвердих матеріалів. Знімання припуску з оброблюваного матеріалу здійснюється при цьому шляхом його крихкого мікроруйнування при високошвидкісній контактній взаємодії з гострими мікро- і субмікрокрайками крайками алмазних зерен. Таким чином, основною причиною для реалізації такого процесу є наявність на зернах гострих мікро- і субмікрокрайок, що досягається шляхом створення передумов ініціюють процес безперервного самозаточування зерен при алмазному шліфуванні. В даний час для оптимізації витрат на наукові дослідження значну перспективу має оптимальне поєднання верстатних і модельних експериментів. При розгляді можливих варіантів САD-систем був зроблений висновок, що для моделювання вібраційного шліфування найбільш підходящим є пакет SolidWorks, що містить плагін Simulation, що базується на методі кінцевих елементів. Встановлено, що накладення механічних коливань (вібрацій) в зону обробки істотно збільшує напружено-деформований стан в зоні контакту алмазного зерна з оброблюваним матеріалом при шліфуванні. Це є позитивним моментом в плані активації процесу самозаточування алмазних зерен шляхом їх мікро- і макроруйнування. Встановлено також, що в разі введення в зону обробки механічних коливань напруги рівномірно розподіляються вздовж усього зерна, що в свою чергу покращує його утримання в зв'язці, а, отже, сприяє більш повному використанню ресурсу алмазних зерен. В кінцевому рахунку, це призводить до підвищення ефективності процесу шліфування за рахунок збільшення продуктивності обробки і зниження питомої витрати алмазів кола.*

**Ключові слова:** *полікристалічні надтверді матеріали, алмазні зерна круга, зв'язка круга, самозагострювання зерен, нормальна і тангенціальна складові сили різання, періодичність процесу шліфування, вібраційне шліфування, напружено-деформований стан, еквівалентні напруження, планування експерименту.*

Vladimir Fedorovich, Ivan Pyzhov,  
Irina Voloshkina, Kharkov, Ukraine

## MODELING OF THE PROCESS OF VIBRATORY GRINDING BY FINITE ELEMENT METHOD

**Abstract.** *Results of modeling of process of vibration diamond grinding of polycrystalline supersolid materials on the basis of diamond and dense modifications of nitride of a pine forest are given. On the present diamond grinding by circles on various sheaves is one of the most widespread methods of shaping of products (including the cutting tools) from polycrystalline supersolid materials. Allowance renting from the processed material is carried out at the same time by its fragile microdestruction in high-speed contact interaction with sharp micro- and submicroedges edges of diamond grains. Thus, the main prerequisite for realization of such process is existence on grains of sharp micro- and submicroedges that is reached by creation of prerequisites of the grains initiating process of continuous*

*self-sharpening at diamond grinding. Now for optimization of costs of scientific research the optimum combination of machine and model experiments has considerable prospect. By consideration of possible options of CAD systems the conclusion was drawn that for modeling of vibration grinding by the most suitable the SolidWorks package containing Simulation plug-in which is based on a finite element method is. It is established that imposing of mechanical oscillations (vibrations) in a processing zone significantly increases the intense deformed state in a zone of contact of diamond grain with the processed material when grinding. It is positive the moments in respect of activation of process of self-sharpening of diamond grains by their micro and macrodestructions. It is established also, that in case of introduction to a zone of processing of mechanical oscillations of tension are evenly distributed along all grain that in turn improves its deduction in a sheaf, and, therefore, promotes fuller use of a resource of diamond grains. Eventually, it leads to increase in efficiency of process of grinding due to increase in productivity of processing and decrease in a specific consumption of diamonds of a circle.*

**Keywords:** *polycrystalline superhard materials, diamond grains of a circle, ligament of a circle, self-sharpening of the grains, normal and tangential components of the cutting force, periodicity of the grinding process, vibration grinding, deflected mode, equivalent stresses, design of experiments.*