

УДК 621.923

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

Наведені результати моделювання процесу вібраційного алмазного шліфування з використанням методу кінцевих елементів. Установлено, що накладення вібрацій у зону обробки суттєво збільшує напружено-деформований стан зони шліфування, що сприяє підвищенню продуктивності обробки.

Приведены результаты моделирования процесса вибрационного алмазного шлифования с использованием метода конечных элементов. Установлено, что наложение вибраций в зону обработки существенно увеличивает напряженно-деформированное состояние зоны шлифования, что способствует повышению производительности обработки.

The results of the simulation of vibration diamond grinding using the finite element method are given. It is established that the imposition of vibrations in the treatment area significantly increases the stress-strain state of the grinding zone, which contributes to an increase in processing performance.

1. 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 $0,4 \times 0,4 \times 0,4$ мм и $0,4 \times 0,4 \times 0,2$ 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).

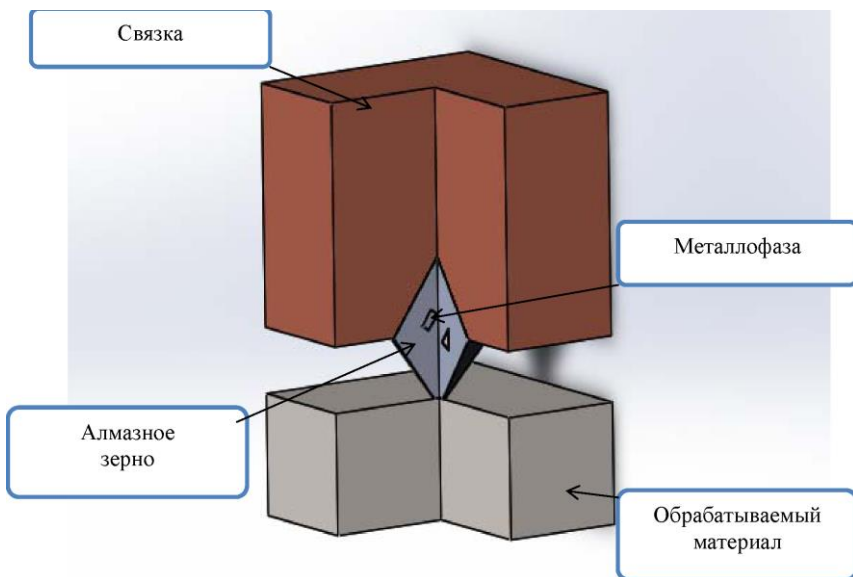


Рисунок 1 – Исходная 3D-модель системы
«связка – алмазное зерно – металлофаза – обрабатываемый материал»

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 сверхтвёрдый материал (ПСТМ), металлофаза – никель. В качестве материала зерна выбран алмаз марки АС100 зернистостью 160/125, обладающий следующими прочностными характеристиками:

$\sigma_{\text{раст}} = 2,18 \text{ ГПа}$; $\sigma_{\text{сж}} = 12,9 \text{ ГПа}$ [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).

Моделирование вибрационного шлифования производилось путем варьирования усилия прижима алмазного шлифовального круга со временем. Для этого усилие прижима задавалось в виде гармонической нагрузки, график которой имел вид синусоиды (рис. 3) с частотой $10 \div 50 \text{ кГц}$ и амплитудой равной приложенной нагрузке.

Влияние ультразвуковых колебаний на НДС в зоне контакта «зерно-связка». 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. В связи с этим была поставлена задача изучения НДС в зоне контакта «зерно-связка» при ультразвуковом шлифовании путем 3D моделирования. Было проведено сравнение состояния зоны контакта «зерно – связка» при шлифовании 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 шлифования без вибрационных 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 вибрационном шлифовании напряжения в контакте «зерно-связка» на 40% (рис. 4) меньше чем при традиционном шлифовании, что положительно сказывается на удержании зерна в связке.

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.

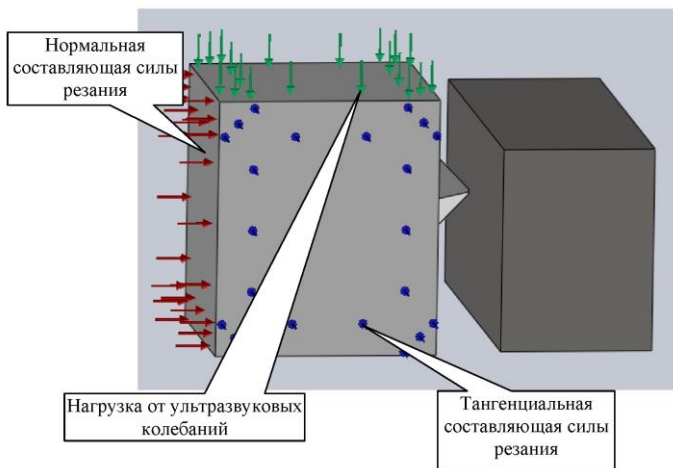


Рисунок 2 – Задание нагрузки при шлифовании с наложением ультразвуковых колебаний

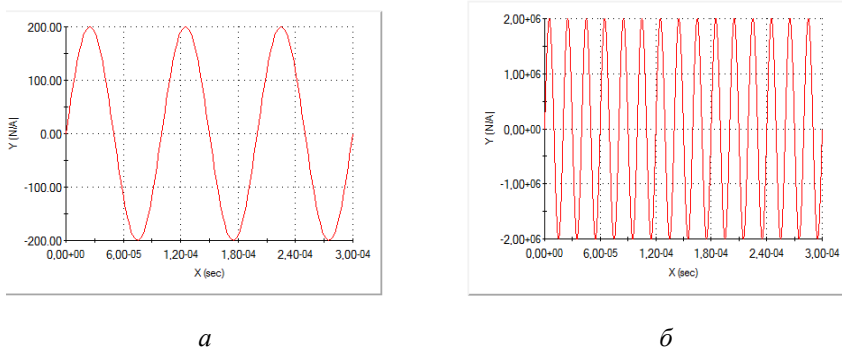


Рисунок 3 – График гармонической нагрузки амплитудой 2 МПа:
 $a - f = 10 \text{ кГц}$; $b - f = 50 \text{ кГц}$

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.

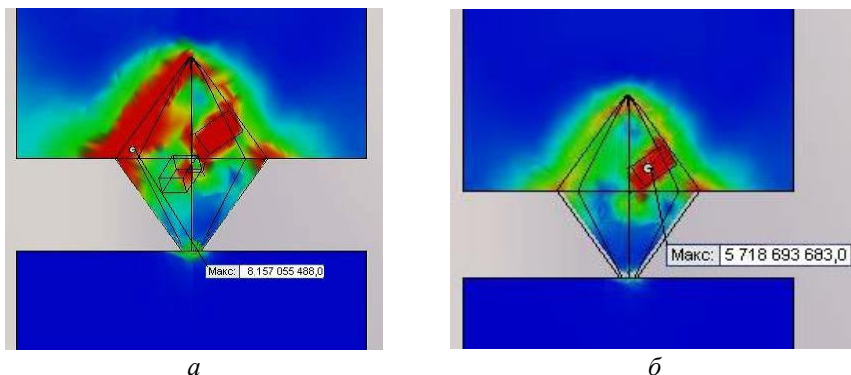


Рисунок 4 – Распределение эквивалентных напряжений в контакте «зерно – связка» при шлифовании без ультразвука (а) и с ультразвуком (б)

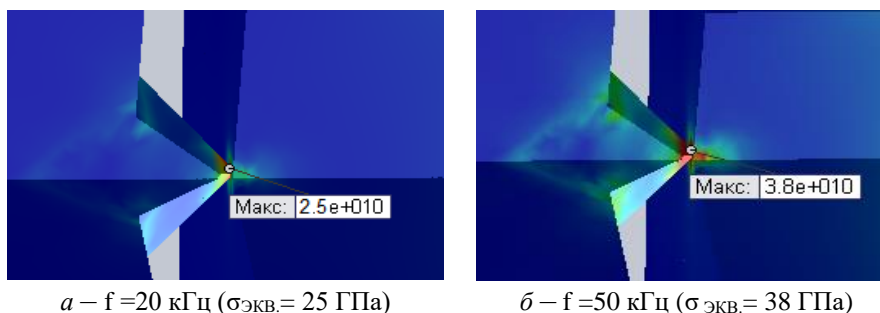


Рисунок 5 – Распределение эквивалентных напряжений при изменении частоты колебаний вибрационного шлифования

В качестве факторов были приняты: частота колебаний, модуль упругости связки, коэффициент термического расширения (КТР) металлофазы и процентное содержание металлофазы в алмазном зерне. Обрабатываемым 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 связи		КТР металлофазы		Количество включений металлофазы	
	Натуральное значение, Гц	Кодированное значение X_1	Натуральное значение, Н/м ²	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:

$$\begin{aligned}
 Y = & 9,267 - 0,394X_1 + 0,659X_2 + 0,984X_3 + 2,529X_4 - 1,098 X_1X_2 + 0,082X_1X_3 - \\
 & - 0,543X_1X_4 - 0,416X_2X_3 + 0,13X_2X_4 + 0,468X_3X_4 - 0,016X_1^2 + 2,08X_2^2 - 2,07X_3^2 - 1,57X_4^2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

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

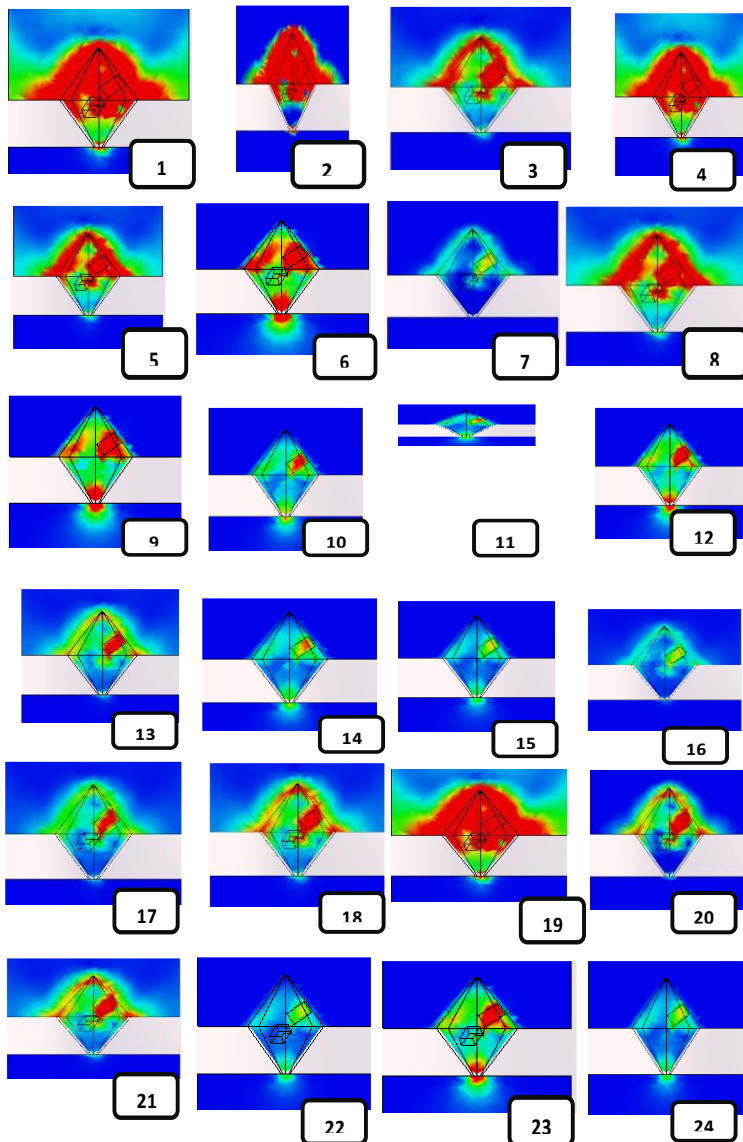


Рисунок 6 – Визуализация результатов моделирования по влиянию выбранных факторов на НДС зоны шлифования

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 $\sigma_{экр}$ 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 $\sigma_{экр}$ 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).

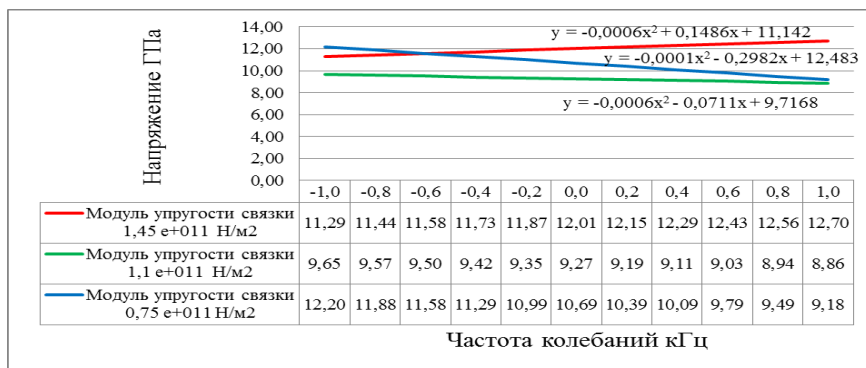


Рисунок 7 – Зависимость $\sigma_{экр}$ от частоты вибрационных колебаний при изменении модуля упругости связки алмазного круга

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

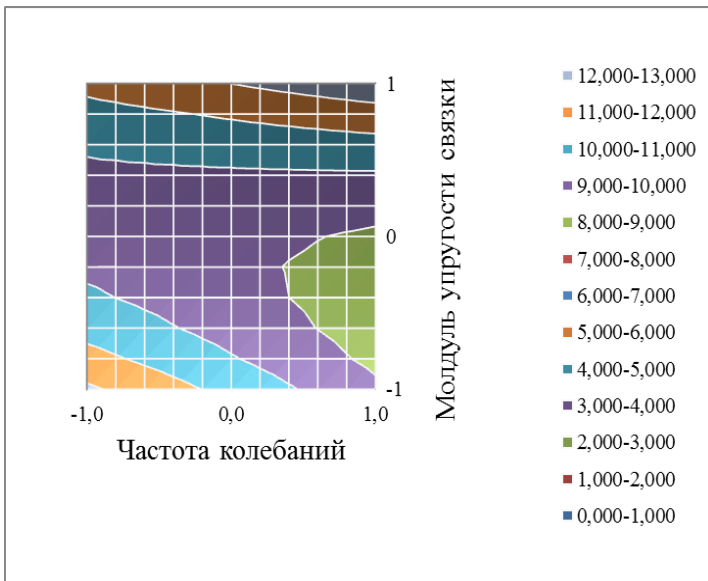


Рисунок 8 – Визуализация зависимости значения $\sigma_{экр}$ от частоты колебаний и модуля упругости связки

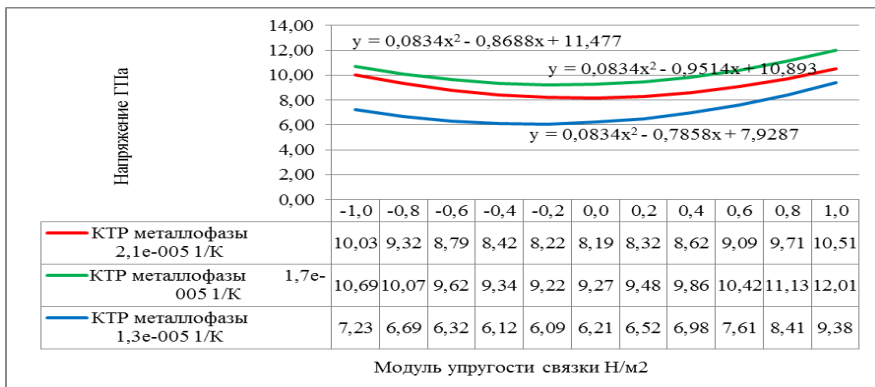


Рисунок 9– Зависимость $\sigma_{экр}$ от модуля упругости связки при изменении КТР металлофазы

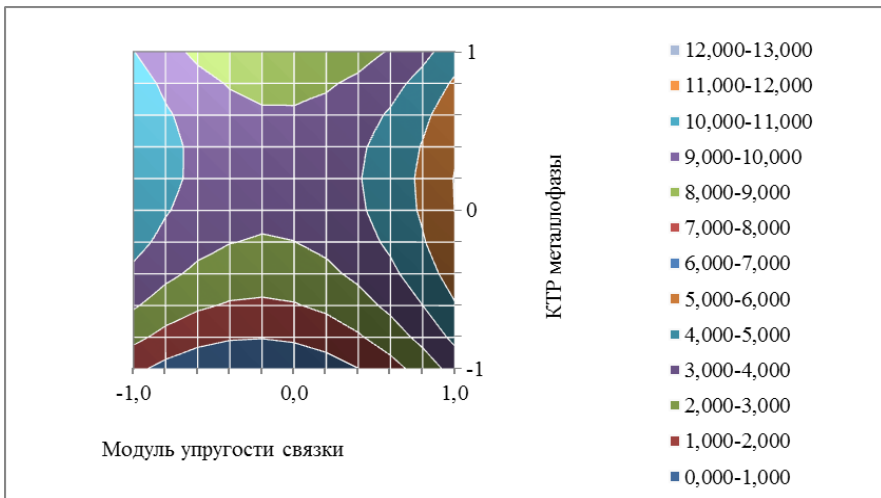


Рисунок 10 – Визуализация зависимости значения $\sigma_{\text{экв}}$ от модуля упругости связки при изменении КТР металлофазы

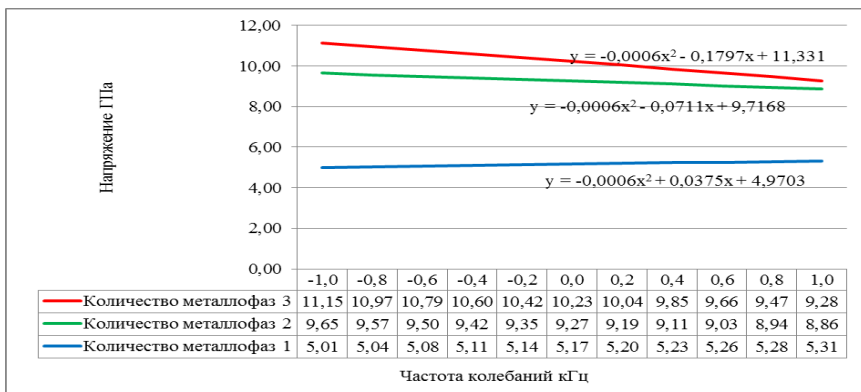


Рисунок 11 – Зависимость $\sigma_{\text{экв}}$ от частоты колебаний при варьировании количества металлофаз

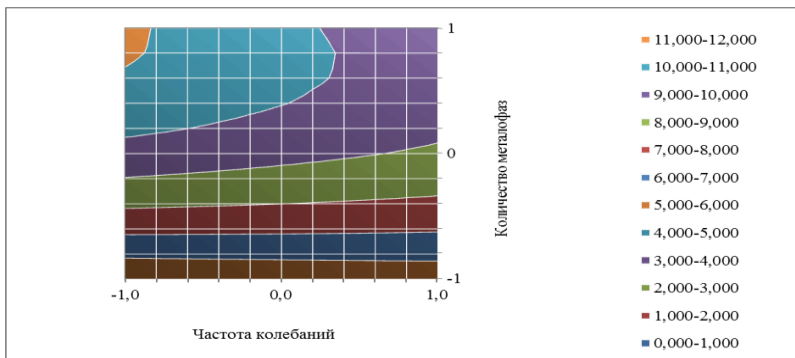


Рисунок 12 – Визуализация зависимости значения $\sigma_{\text{экв.}}$ от частоты колебаний и количества металлофазы

Оптимизация процесса ультразвукового шлифования. Оптимизация процесса ультразвукового шлифования проведена в программном пакете Maple 14. В результате были установлены оптимальные значения факторов ($X_{1\text{опт}}=-1$; $X_{2\text{опт}}=1$; $X_{3\text{опт}}=0,23$; $X_{4\text{опт}}=-1$) при которых максимальное напряжение составляет $Y_{\text{max}}=8,64$ ГПа. Переводя эти данные в реальные значения получим, что оптимальное значение частоты колебаний составляет 10 кГц, модуль упругости связки $6,9\text{e}+011$ Н/м², КТР металлофазы $2,1\text{e}-005$ 1/К, оптимальное количество металлофазы должно составлять 1, что соответствует 3% металлофазы в алмазном зерне.

Визуализация оптимального значения напряжений приведена на рис. 13 – 14.

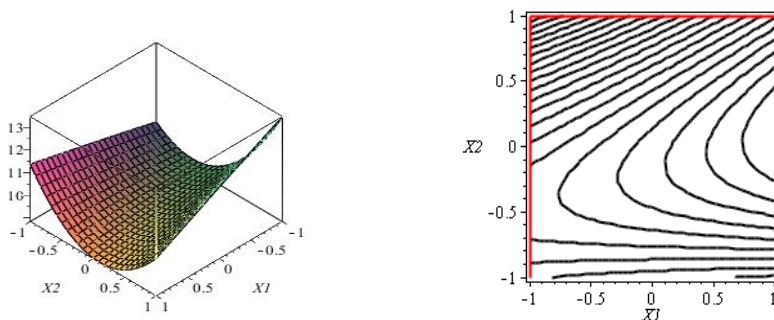


Рисунок 13 – Зависимость максимальных напряжений от частоты колебаний (X_1) и модуля упругости связки (X_2)

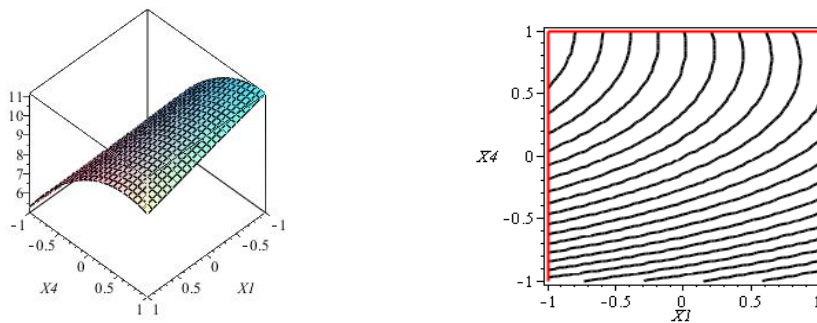


Рисунок 14 – Зависимость максимальных напряжений от частоты колебаний (X_1) и количества металлофазы в зерне (X_4)

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.