

УДК 621.923

В.А. Федорович д-р техн. наук, Е.В. Островерх канд. техн. наук,
Н.В.Козакова канд. техн. наук, Харьков, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОЧЕТАНИЯ КОМПОНЕНТОВ В СПЕКАЕМОМ СЛОЕ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Представлено результати теоретичного визначення структури й фізико-механічних властивостей алмазно-абразивних інструментів на етапах їх проектування й виготовлення. Шляхом розрахунків методом кінцевих елементів напружено-деформованого стану зони спікання алмазно-абразивного інструмента без тривалих і трудомістких експериментальних досліджень можна визначити оптимальні характеристики алмазних кругів.

Ключові слова: алмазне зерно, металофаза, зв'язка, напружено-деформований стан, планування експеримента

Представлены результаты теоретического определения структуры и физико-механических свойств алмазно-абразивных инструментов на этапах их проектирования и изготовления. Путем расчетов методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния зоны спекания алмазно-абразивного инструмента без длительных и трудоемких экспериментальных исследований можно определять оптимальные характеристики алмазных кругов.

Ключевые слова: алмазное зерно, металлофаза, связка, напряженно-деформированное состояние, планирование эксперимента

The results of the theoretical determination of the structure and physical and mechanical properties of diamond-abrasive tools at the stages of their design and making are presented. It is established that by calculating the stress-strain state of the sintering zone of diamond abrasive tool by the finite element method, it is possible to determine the optimum characteristics of diamond wheels without long and labour intensive experimental researches.

Keywords: diamond grain, metal phase, bundle, stress-strain state, experiment planning

Эффективность процесса алмазного шлифования во многом определяется еще на этапе проектирования инструмента путем выбора оптимального сочетания компонентов и свойств алмазоносного слоя. Эта задача, решаемая ранее путем трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований, в настоящее время может быть решена теоретически с использованием метода конечных элементов [1, 2]. Эта методология позволяет расчетным путем выбрать оптимальные технологические параметры изготовления алмазных кругов. Правильный выбор состава композита в зависимости от назначения круга должен базироваться на научно обоснованных рекомендациях по оптимальному сочетанию концентрации, зернистости и прочности алмазных зерен, свойств связки, а также наличию покрытий, защищающих алмаз от деструкции при горячем прессовании [3]. Для обеспечения работы кругов в режиме

самозатачивания такой подход является единственно верным. Учитывая тот факт, что в зависимости от свойств алмазных порошков их стоимость может отличаться в сотни раз, обоснованный выбор марки абразива является необходимым и с точки зрения себестоимости алмазно-абразивного инструмента. В то же время, существующие в литературе рекомендации носят общий характер и весьма разноречивы, что снижает эффективность их использования и приводит к необоснованному повышению себестоимости алмазных кругов. Не менее важным является правильный выбор технологических параметров изготовления алмазных кругов с учетом физико-химических особенностей процессов, происходящих при их формировании.

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) алмазоносного слоя осуществлялся путем его 3D моделирования. Проводилась серия расчетов для фрагмента алмазоносного слоя, включающего единичное алмазное зерно, окруженное массивом связки (рис. 1). Рассматривались два типа моделей алмазного зерна. Первая модель представляет собой эллипсоид вращения (рис. 1 а), вторая – октаэдр (рис. 1 б). В зависимости от рассматриваемой зернистости, размеры зерен варьировались от $50 \times 30 \times 30$ до $500 \times 300 \times 300$ мкм. Наличие металла-катализатора в алмазных зернах моделировалось произвольно ориентированными пластинами, объемное содержание которых составляло 5 или 10 %. Рассматривалось наличие одного или двух включений металлофазы, расположенных на периферии зерна. Связка представлялась в виде кубического фрагмента с размерами от $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ до $3 \times 3 \times 3$ мм в зависимости от размера и концентрации зерен. При моделировании варьировались размер зерна, соответствующий зернистостям от 50/40 до 500/400 мкм, температура и давление спекания, а также физико-механические свойства исследуемых компонентов спека. В модели зерно и связка рассматривались упругими сплошными телами. Модель нагружалась статической одноосной равномерно распределенной нагрузкой, а также температурой, приложенной к моделируемым телам.

Поскольку предел прочности алмаза при растяжении ниже предела прочности при сжатии [4], то в качестве критерия разрушения принимались полученные расчетным путем значения максимальных растягивающих напряжений алмазов различных марок и зернистостей [2]. Теоретические расчеты в программном пакете *CosmosWorks* позволили рассчитать эквивалентные напряжения в спекаемых элементах с учетом их размеров, физико-механических свойств элементов модели и условий спекания. В расчетную модель закладывались следующие характеристики материалов: модуль упругости, коэффициент Пуассона, массовая плотность материала, коэффициент линейного термического расширения, теплопроводность материала и его удельная теплоемкость (рис. 2).

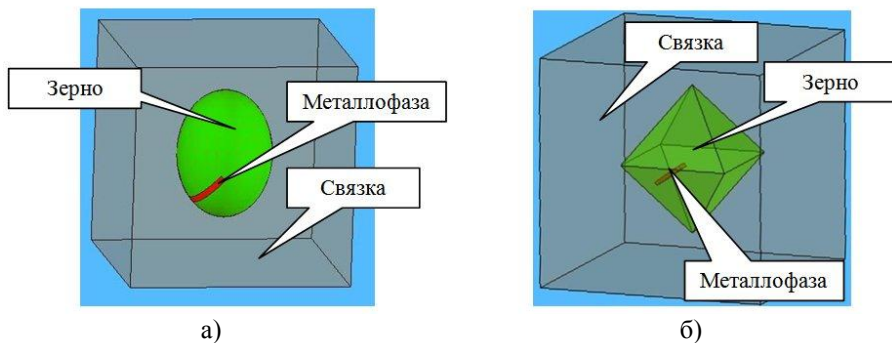


Рисунок 1 – Расчетная схема и 3D модель системы «металлофаза–алмазное зерно–связка»

Материал

Выбрать источник материала

- Использовать материалы SolidWorks
- Определенный пользователем
- Библиотека Centor
- Библиотечные файлы
 - cosmos materials
 - Other Alloys (3)
 - Plastics (19)
 - Other Metals (11)
 - Beryllium
 - Cobalt
 - Molybdenum
 - Nickel**
 - Pure Gold
 - Pure Lead
 - Pure Silver
 - Titanium
 - Tungsten
 - Vanadium
 - Zirconium
 - Other Non-metal

Свойства | Таблицы и кривые | Кривые усталости SN

Свойства материала

Тип модели:

Единицы:

Категория:

Имя:

Описание:

Свойств	Описание	Значение	Единицы из	Зависимость
EX	Модуль упругости	2.1e+011	N/m ²	Постоянная
NUXY	Коэффициент Пуассона	0.31	NA	Постоянная
GXY	Модуль сдвига	7.9e+010	N/m ²	Постоянная
DENS	Массовая плотность	8500	kg/m ³	Постоянная
SIGXT	Предел прочности при растяжении	317000000	N/m ²	Постоянная
SIGXC	Предел прочности при сжатии		N/m ²	Постоянная
SIGYLD	Предел текучести	59000000	N/m ²	Постоянная
ALPX	Коэффициент теплового расширения	1.7e-005	/Kelvin	Постоянная
KX	Теплопроводность	43	W/(m.K)	Постоянная
C	Удельная теплоемкость	460	J/(kg.K)	Постоянная

Рисунок 2 – Задаваемые значения физических свойств материалов в CosmosWorks

Нагружение системы «металлофаза–алмазное зерно–связка» осуществлялось по трем вариантам: только давлением (50–500 МПа); только температурой нагрева (400 °С и 800 °С); одновременно давлением и температурой.

В качестве реакции модели на нагружение рассматривались главные нормальные напряжения в узлах сетки, принадлежащих модели алмазного зерна и окружающей его связки. Расчетная конечно-элементная модель представлена на рис. 3.

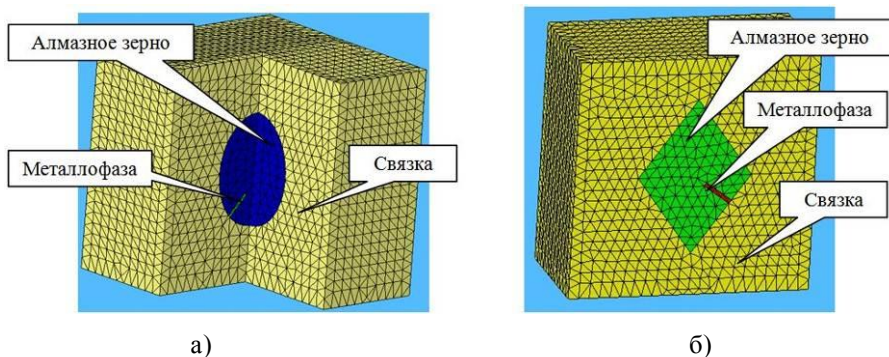


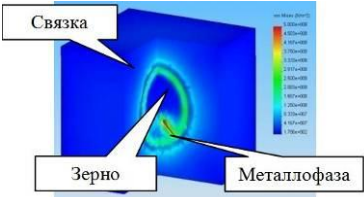
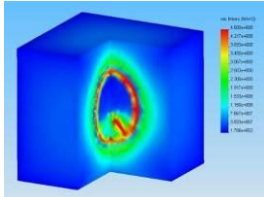
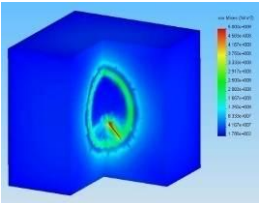
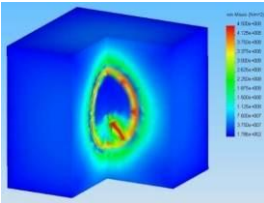
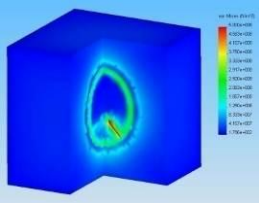
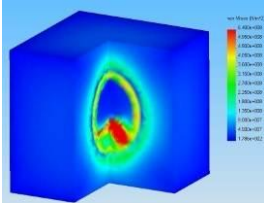
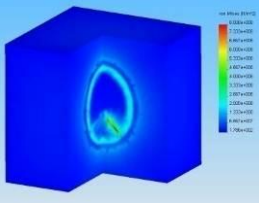
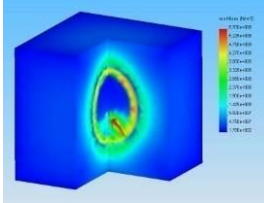
Рисунок 3 – Расчетная конечно-элементная 3D модель для: эллипсоида (а), октаэдра (б)

Выполненные расчеты показали, что нагружение системы «металлофаза–алмазное зерно–связка» только давлением во всем интервале его технологических значений для различных видов связок и марок алмазных зерен незначительно влияет на напряжения в исследуемой системе и не приводит к нарушению целостности алмазных зерен, в отличие от температуры, вызванные которой напряжения имеют гораздо большие значение и иную картину распределения.

Марка связки круга, определяющая надежность укрепления алмазных зерен в круге, обуславливает технологические режимы (давление и температуру) спекания алмазоносного слоя. Поэтому влияние ее свойств и режимов спекания на 3D напряженно-деформированное состояние алмазоносного слоя является взаимосвязанным. Результаты расчетов НДС алмазоносного слоя при спекании различных связок приведены в табл. 1.

Зависимости напряжений в системе «металлофаза–алмазное зерно–связка» от температуры для различных видов связок представлены в рис. 4.

Таблица 1 – Влияние свойств связки и технологических режимов спекания на целостность алмазного зерна

Марка связки	Температура спекания, °C	
	400	800
Керамическая	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 1,09 \text{ ГПа}$</p>	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 2,43 \text{ ГПа}$</p>
Алюминиевая	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 1,33 \text{ ГПа}$</p>	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 2,47 \text{ ГПа}$</p>
Железная	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 1,39 \text{ ГПа}$</p>	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 2,5 \text{ ГПа}$</p>
Бронзовая	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 2,07 \text{ ГПа}$</p>	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 3,72 \text{ ГПа}$</p>

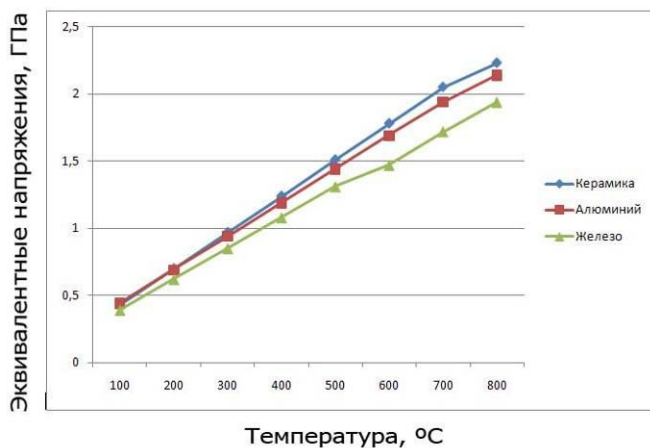


Рисунок 4 – Динамика изменения эквивалентных напряжений в системе «металлофаза–алмазное зерно–связка» с алмазным зерном марки AC100 (200/160)

Увеличение модуля упругости связки круга, как и увеличение температуры спекания, приводят к росту напряжений в связке и в зерне, которые могут достигать предела прочности для определенных марок алмаза. Расчеты также показывают, что очагом возникновения предельных напряжений во всех случаях является область металлических включений в алмазных зернах, о чем свидетельствуют поля приведенных напряжений для зерна марки AC100 (200/160), спекаемого на керамической связке при температуре 800 °C, представленные на рис. 5.

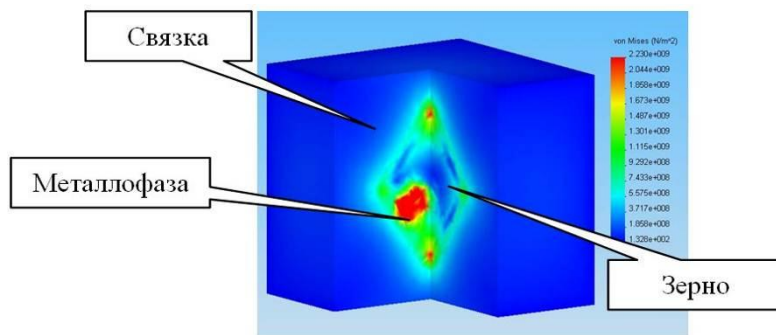


Рисунок 5 – Поля приведенных напряжений при спекании зерна марки AC100 (200/160)

Таким образом, наиболее значимыми параметрами с точки зрения сохранения целостности алмазоносного слоя в процессе изготовления круга являются температура спекания, а также модуль упругости связки, увеличение значений которых усиливает напряженное состояние зерна.

Ранее, при исследовании НДС системы «металлофаза–алмазное зерно–связка» [2, 5], расчетная модель строилась на основании допущения относительно изотропности свойств всех материалов системы. Однако известно, что кристалл алмаза, как поликристаллическое образование, обладает выраженной анизотропией свойств [6], для определения влияния которой проводилось моделирование процесса спекания алмазоносного слоя зерна АС160 зернистостью 200/160 при температуре спекания 700 °С. Данное алмазное зерно практически не имеет включений металлофазы, поэтому с его помощью можно наглядно оценить разницу в НДС системы при различных ориентациях алмазного зерна.

В данных расчетах принимался вариант, при котором модуль упругости одной из трех плоскостей сдвига $\{110\}/\{111\}/\{101\}$ равен соответственно 900/750/700 МПа. Результаты расчетов, показанные на рисунке 6 (а, б, в), представляют НДС системы «металлофаза–алмазное зерно–связка» при ориентировании фронтальной плоскости в качестве плоскости $\{110\}$, $\{111\}$ и $\{101\}$ кристалла соответственно.

Анализ полученных результатов расчета эквивалентных напряжений показал, что несмотря на разницу в картинах НДС алмазоносного слоя при различных ориентациях алмазного зерна, значения напряжений меняются всего на 10 %. Поэтому результаты расчетов без учета анизотропии можно считать адекватными.

Одним из эффективных методов повышения износостойкости алмазно-абразивного инструмента является металлизация сверхтвердых абразивных материалов, целесообразность которой убедительно доказана отечественной и зарубежной практикой [7, 8]. Применение алмазных зерен с различными видами покрытий может существенно расширить возможности бездефектного изготовления кругов на различных связках. Для подтверждения этого проведены расчетные эксперименты по изучению напряженно-деформированного состояния системы «металлофаза–алмазное зерно–покрытие–связка» с применением метода конечных элементов. Трехмерная модель данной системы представлена на рис. 6.

При моделировании процесса спекания в качестве факторов принимались: режимы спекания (температура, °С), свойства покрытия (модуль упругости при 500 °С), свойства связки (модуль упругости при 500 °С), свойства металла-катализатора (коэффициент термического расширения (КТР) при 500 °С), описание которых представлено в табл. 2.

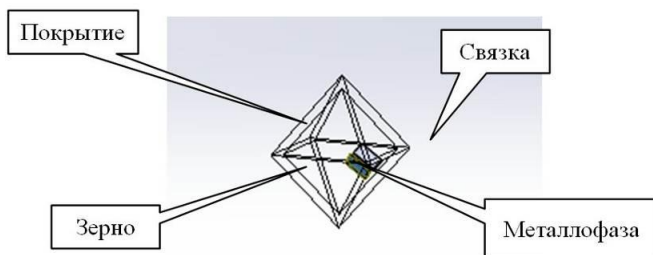


Рисунок 6 – Трехмерная модель системы «металлофаза–алмазное зерно–покрытие–связка»

Таблица 2 – Уровни факторов

Уровни факторов	Факторы							
	Режимы спекания (температура °С)		Свойства покрытия (модуль упругости при 500 °С), Н/м ²		Свойства связки (модуль упругости при 500 °С), Н/м ²		Свойства металла-катализатора (КТР при 500 °С), 1/К	
	Натуральное значение, °С	Кодированное значение X1	Натуральное значение, Н/м ²	Кодированное значение X2	Натуральное значение, Н/м ²	Кодированное значение X3	Натуральное значение, 1/К	Кодированное значение X4
Верхний уровень	800	+1	3.2 E+011	+1	1.9E+011	+1	2.4E-05	+1
Основной уровень	500	0	2.7E+011	0	1.5E+011	0	2.05E-05	0
Нижний уровень	200	-1	2.2E+011	-1	1.1E+011	-1	1.7E-05	-1

Значения исследуемых факторов для уравнения регрессии, представленные в табл. 3, позволили провести 24 расчетных эксперимента, визуализация результатов которых показана на рис. 7.

Таблица 3 – Условия и результаты планируемого расчетного эксперимента для спекания алмазных кругов

№ эксперимента	Режимы спекания (температура °C)	Свойства покрытия (модуль упругости при 500 °C), Н/м ²	Свойства связки (модуль упругости при 500 °C), Н/м ²	Свойства металла-катализатора (КТР при 500 °C), 1/К	У напряжение в зерне, ГПа
1	800	3.2E+011	1.9E+011	2.4E-05	3.58
2	200	3.2E+011	1.9E+011	2.4E-05	0.84
3	800	2.2E+011	1.9E+011	2.4E-05	3.70
4	200	2.2E+011	1.9E+011	2.4E-05	0.91
5	800	3.2E+011	1.1E+011	2.4E-05	3.94
6	200	3.2E+011	1.1E+011	2.4E-05	1.05
7	800	2.2E+011	1.1E+011	2.4E-05	3.82
8	200	2.2E+011	1.1E+011	2.4E-05	1.03
9	800	3.2E+011	1.9E+011	1.7E-05	3.27
10	200	3.2E+011	1.9E+011	1.7E-05	0.68
11	800	2.2E+011	1.9E+011	1.7E-05	3.47
12	200	2.2E+011	1.9E+011	1.7E-05	0.79
13	800	3.2E+011	1.1E+011	1.7E-05	3.98
14	200	3.2E+011	1.1E+011	1.7E-05	1.09
15	800	2.2E+011	1.1E+011	1.7E-05	3.85
16	200	2.2E+011	1.1E+011	1.7E-05	1.05
17	800	2.7E+011	1.5E+011	2.05E-05	10.42
18	200	2.7E+011	1.5E+011	2.05E-05	1.78
19	500	3.2E+011	1.5E+011	2.05E-05	3.11
20	500	2.7E+011	1.5E+011	2.05E-05	3.06
21	500	2.7E+011	1.9E+011	2.05E-05	4.32
22	500	2.7E+011	1.1E+011	2.05E-05	4.28
23	500	2.7E+011	1.5E+011	2.4E-05	4.31
24	500	2.7E+011	1.5E+011	1.7E-05	4.25

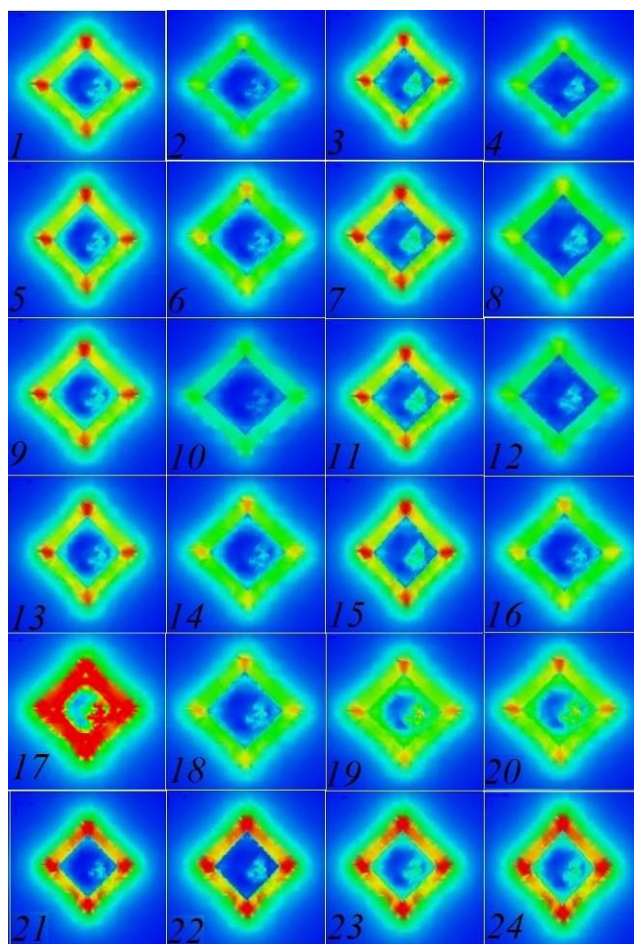


Рисунок 7 – Визуализация результатов моделирования влияния выбранных факторов на НДС зоны спекания алмазonoсного слоя

Напряжения, превышающие пределы прочности алмаза, расположены на границах включений металлофазы, вызывают развитие внутренних трещин в зерне. Проведение 24-х модельных экспериментов позволило установить математические зависимости между основными факторами, влияющими на состояние алмазonoсного слоя. Обработка результатов планируемого эксперимента позволила получить математическую модель, адекватно описывающую процесс спекания алмазных шлифовальных кругов с

покрытием в представленном диапазоне варьирования независимых факторов:

$$Y = 5,150 + 1,712X_1 - 0,008X_2 - 0,141X_3 + 0,042X_4 + 0,003X_1X_2 - 0,036X_1X_3 + 0,016X_1X_4 - 0,051X_2X_3 + 0,006X_3X_4 - 0,059X_3X_4 + 0,950X_1^2 - 2,065X_2^2 - 0,850X_3^2 - 0,870X_4^2 \quad (1)$$

Анализ влияния физико-механических свойств покрытия на напряжения в алмазном зерне показал, что сохранению целостности зерен круга отвечают максимальные значения модуля упругости материала покрытия. Так увеличение последнего с 220 до 320 ГПа приводит к уменьшению расчетных напряжений в зерне более чем в 3 раза. Наименьшие напряжения 0,68 ГПа в алмазном зерне, обеспечивающие их целостность при спекании круга, возникают при $T = 200$ °С, модуле упругости материала покрытия 320 ГПа, модуле упругости связки круга 190 ГПа и КТР металла-катализатора $1,7 \cdot 10^{-5}$ 1/К. Оптимизация полученного уравнения регрессии позволила получить значения факторов, при которых напряжения в алмазных зернах обеспечат эффективный процесс спекания алмазоносного слоя круга.

Исследования, выполненные с использованием представленной методологии трехмерного моделирования процесса изготовления алмазно-абразивного инструмента, и анализ полученных результатов позволили сделать следующие выводы.

– теоретические исследования показали, что алмазные шлифовальные круги вне зависимости от типа связки имеют исходную дефектность в виде разрушенных в процессе спекания алмазных зерен, главной причиной которой являются внутренние напряжения в зерне, обусловленные существенным различием значений коэффициентов термического расширения алмаза и включений металла-катализатора в нем;

– увеличение прочности связки круга и связанное с ним повышение температуры спекания алмазоносного слоя приводят к разрушению алмазных зерен определенных марок и зернистостей при изготовлении алмазно-абразивных инструментов;

– определяющую роль в обеспечении целостности алмазных зерен при спекании композиционных алмазных материалов играют качественные и количественные характеристики металла-катализатора. Преобладающее влияние на появление разрушающих напряжений имеет коэффициент термического расширения включений металлофазы, который значительно растет при нагревании: так при повышении температуры спекания до 800 °С уровень возникающих напряжений увеличивается в 1,2 и 1,6 раза для металлических и керамических связей соответственно;

– расчеты с учетом анизотропии алмазных зерен показали ее

незначительное, в пределах 10 %, влияние на напряженно-деформированное состояние спекаемой алмазно-абразивной композиции;

– на основе теории планирования эксперимента проведена оптимизация результатов 3D моделирования процесса спекания алмазно-абразивных композиций с металлическим покрытием зерен, что позволило теоретическим путем определить оптимальные значения факторов, при которых напряжения будут минимальны.

Список использованных источников: 1. 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. – Харьков, 2002. – 466 с. 2. Козакова Н.В. Определение рациональных характеристик алмазных кругов путем 3D моделирования процессов их изготовления и шлифования сверхтвердых материалов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 2005. – 210 с. 3. Грабченко А.И. 3D моделирование процессов алмазно-абразивной обработки / А.И. Грабченко, В.А. Федорович. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 345 с. 4. Федорович В.А., Козакова Н.В. Влияние прочности элементов системы «СТМ–зерно–связка» на эффективность шлифования // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – № 9, т. 1. – С. 85-92. 5. Грабченко А.И., Федорович В.А., Островерх Е.В., Козакова Н.В. Моделирование процесса спекания алмазных кругов на металлических связках с целью определения их рациональных характеристик // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2017. – Вып. 87. – С. 42-51. 6. Епифанов В.И. Технология обработки алмазов в бриллианты / В.И. Епифанов, А.Я. Песина, Л.В. Зыков. – М.: Высшая школа, 1984. – 319 с. 7. Чистяков Е.М. Инструмент из металлизированных сверхтвердых материалов / Е.М. Чистяков, А.А. Шепелев, Т.М. Дуда. – К.: Наукова думка, 1982. – 204 с. 8. Mamalis A.G. Ways of simulation-based improvement in the performance of diamond-abrasive tools / A.G. Mamalis, A.I. Grabchenko, V.A. Fedorovich, J. Kundrak, E.A. Babenko // Journal of Machining and Forming Technologies. – New York: Nova Publishers, 2012. – Vol. 4, Issue 1–2, p. 1–11.

Bibliography (transliterated): 1. Fedorovich V.A. Razrabotka nauchnyh osnov i sposobov prakticheskoy realizacii upravlenija prispособlivaemost'ju prialmaznom shlifovanii sverhtverdyh materialov: Dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.03.01. – Har'kov, 2002. – 466 s. 2. Kozakova N.V. Opredelenie racional'nyh karakteristikalmaznyh krugov putem 3D modelirovaniija processov ih izgotovlenija i shlifovanija sverhtverdyh materialov: Dis. ... kand. tehn. nauk: 05.03.01. – Har'kov, 2005. – 210 s. 3. Grabchenko A.I., Fedorovich V.A. 3D modelirovanie processovalmazno-abrazivnoj obrabotki. – Har'kov: NTU «HPI», 2008. – 345 s. 4. Fedorovich V.A., Kozakova N.V. Vlijanie prochnosti jelementov sistemy «STM–zerno–svjazka» na jeffektivnost' shlifovanija / Visnik Nacional'nogo tehnicnogouniversitetu «Harkivsk'ij politehnicnij institut». – Harkiv: NTU «HPI». – 2003. – № 9, t. 1. – S. 85-92. 5. Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Ostroverh E.V., Kozakova N.V. Modelirovanie processa spekanijaalmaznyh krugov na metallicheskih svjazkah s cel'ju opredelenija ih racional'nyh karakteristik / Rezanie i instrument v tehnologicheskijh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: NTU «HPI», 2017. – Vip. 87. – С. 42-51. 6. Epifanov V.I., Pesina A.Ja., Zыkov L.V. Tehnologija obrabotkialmazov v brilliandy. – M.: Vysshaja shkola, 1984. – 319 s. 7. Chistjakov E.M., Shepelev A.A., Duda T.M. Instrument iz metallizirovannyh sverhtverdyh materialov. – K.: Naukova dumka, 1982. – 204 s. 8. Mamalis A.G., Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Kundrak J., Babenko E.A. Ways of simulation-based improvement in the performance of diamond-abrasive tools / Journal of Machining and Forming Technologies. – New York: Nova Publishers, 2012. – Vol. 4, Issue 1-2, p. 1-11.