

Е.А. Бабенко, В.А. Федорович, д-р техн. наук, Харьков, Украина

3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Наведені результати досліджень по 3D моделюванню НДС алмазозного шару при спіканні шліфувального кругу. Досліджувався вплив фізико-механічних властивостей компонентів алмазозного шару на виникаючі внутрішні навантаження.

Приведенные результаты исследований по 3D моделированию НДС алмазозного пласта при спекании шлифовального круга. Исследовалось влияние физико-механических свойств компонентов алмазозного пласта на возникающие внутренние нагрузки.

Results of researches on 3D-modeling of the VAT of diamond layer are described at sintering circles. Influence of physicommechanical properties of components diamond layer on arising internal pressure was investigated

Постановка проблеми. Процес виготовлення алмазних кругів на різних зв'язках характеризується високою трудоемкістю і низкою продуктивністю, великим витратом дорогих алмазних зерен і, як наслідок, високою собівартістю подальшого процесу експлуатації алмазних кругів. Необхідно досягти підвищення надійності і якості при виготовленні алмазно-абразивного інструмента, без чого неможливо його ефективне застосування в виробництві. Виготовлення алмазно-абразивного інструмента, базується на установленні фізичних і технологічних закономірностей процесу спекання алмазозного шару. В даний час відсутні науково обґрунтовані рекомендації по вибору раціональних комбінацій міцності, марки зерна, зернистості, концентрації з фізико-механічними властивостями зв'язок. Слід звернути увагу на наявну в літературі рекомендацію по застосуванню в шліфовальних кругах на різних зв'язках тих або інших комбінацій марок зв'язок і алмазних зерен, їх концентрації мають загальний характер, що призводить до пошкодження алмазних зерен в процесі спекання і в подальшому до низької продуктивності процесу абразивної обробки [1,2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що питання підвищення ефективності алмазного шліфування залишається актуальним і сучасні методи математичного моделювання можуть принести значимі результати. Згідно з даними академіка Лолодзе Т.Н., в процесі експлуатації алмазно-абразивного інструмента коефіцієнт ефективного використання алмазних зерен не перевищує 5-10%, решта зерен руйнується ще на етапі виготовлення або випадає в процесі експлуатації круга. Тому на початковому етапі виготовлення алмазного круга на різних зв'язках важливо визначити оптимальні технологічні

параметры его изготовления, а именно давление, температуру и время спекания при которых не будет нарушена целостность алмазных зерен. После этого, на следующем этапе эксплуатации спеченных кругов, необходимо рассмотреть и изучить факторы, уменьшающие производительность процесса алмазного шлифования, что в дальнейшем позволит уменьшить их влияние и достичь высокого коэффициента использования алмазных зерен.

Цель исследования. Целью данной работы является разработка методики определения оптимального сочетания прочностных свойств алмазных зерен и связки, при которых обеспечивается сохранение целостности алмазных зерен в процессе изготовления алмазного круга путем использования процесса 3D моделирования НДС зоны спекания его алмазоносного слоя.

Основные материалы исследования. Был изучен процесс спекания алмазоносного слоя шлифовальных кругов при помощи 3D-моделирования этого процесса. Рассматривалась математическая модель «связка-зерно-металлофаза» и учитывалось влияние компонентов этой системы на ее НДС (напряженно-деформированное состояние) в процессе спекания. Было изучено влияние свойств металлофазы (металла-катализатора) и её процентного содержания на изменение внутренних эквивалентных напряжений в алмазном зерне. При этом процесс моделировался для нескольких марок алмазных зерен и сравнивались полученные результаты. Кроме того, изучено влияние наличия покрытий на алмазных зернах и определен состав покрытия, позволяющий уменьшить эквивалентные напряжения в зерне [6].

В модели зерно и связка рассматривались упругими сплошными телами. Алмазные зерна моделировались в виде октаэдров (рис. 1) с размерами в зависимости от рассматриваемой зернистости от $50 \times 30 \times 30$ до $500 \times 300 \times 300$ мкм (рис. 1б). Наличие металла-катализатора в алмазных зернах моделировалось произвольно ориентированными пластинами, объемное содержание которых составляло 5-10%[7]. Рассматривалось наличие двух металлофаз, расположенных у граней октаэдра. Связка круга 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. Модель нагружалась статической одноосной равномерно распределенной нагрузкой, в виде приложенных значений давления и температуры. Была создана расчетная 3D-модель, а расчеты напряженно-деформированного состояния в модели проводились в приложении CosmosWorks.

Поскольку предел прочности алмаза при растяжении ниже предела прочности при сжатии, то в качестве критерия разрушения принимались полученные расчетным путем значения максимальных растягивающих напряжений алмазов различных марок и зернистостей[4,5].

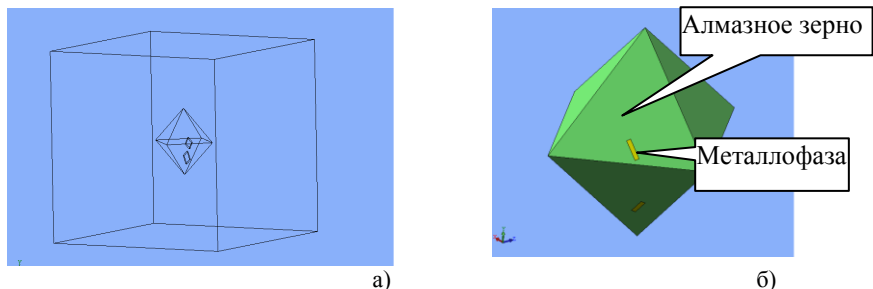


Рисунок 1 — Расчетная модель (а) и 3D-модель системы «алмазное зерно – металлофаза» (б)

После построения расчетной 3D –модели была сгенерирована сетка конечных элементов, причем сетка сгущалась в месте присутствия алмазного зерна и металла-катализатора (рис. 2).

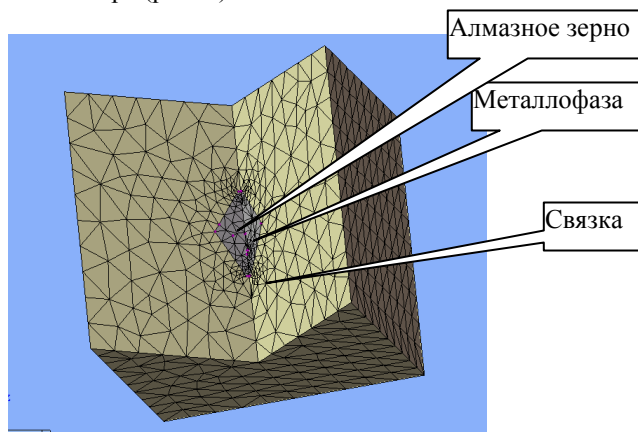


Рисунок 2 — Сгенерированная конечно-элементная сетка в 3D модели

Проведенные теоретические исследования показали, что температура спекания алмазоносного слоя, в отличие от давления, оказывает наибольшее влияние на НДС системы «алмазное зерно- металлофаза-связка», независимо от вида связки. Увеличение напряжений в зёрнах наблюдается по контуру сферы, вписанной в октаэдр, и в местах сосредоточения металлофазы в зерне. Наличие большого количества металлических включений в кристаллах приводит к снижению их прочности и особенно термостойкости. Определено, что нагрев синтетических алмазов, начиная с температуры 750°C приводит к снижению их прочности.

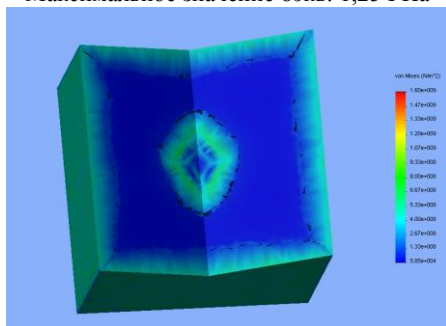
Причиной растрескивания алмазного зерна является различное значение коэффициентов термического расширения металлофазы (остатков металла-

катализатора) и алмазного зерна. Как правило, коэффициент термического расширения металла-катализатора гораздо больше, чем у синтетического алмаза. Поэтому при нагревании происходит, так называемый разрыв алмазного зерна изнутри. На рис. 3 и рис. 4 отображено влияние температуры спекания алмазоносного слоя на изменение эквивалентных напряжений, возникающих в зерне алмазных кругов на основе различных видов связок[3].

Определив значительную роль температурного фактора в разрушении алмазных зерен перешли к изучению влияния свойств металла-катализатора на сохранение целостности алмаза в процессе спекания алмазоносного слоя.

Рассматривались четыре вида металлофазы (с преобладающим содержанием железа, кобальта, никеля и меди) и связка на основе керамики, титана, алюминия, железа и бронзы. Расчетные модели «связка-металлофаза-зерно» нагружались температурой 400 и 800°C. При этом, производилось комбинирование составляющих данной системы для определения оптимального сочетания элементов. Моделирование процесса спекания элемента алмазоносного слоя проводилось для зерна AC100, концентрации 200/160. В ходе расчетов были получены максимальные значения эквивалентных напряжений (табл. 1), которые сравнивались со значениями предела прочности синтетического алмаза на растяжение. Анализируя результаты расчетов, можно сделать вывод, что оптимальными являются такие сочетания зерен и связки, когда металлофаза зерна имеет низкий КТР и низкий модуль упругости, а связка в свою очередь является достаточно прочной. Причем, значение КТР должно являться определяющим при выборе металла-катализатора.

Марка связки: Fe
 Марка зерна: AC50
 Зернистость: 125/100
 Температура спекания: 400°C
 Максимальное значение $\sigma_{\text{экв}}$: 1,25 ГПа



Марка связки: Fe
 Марка зерна: AC50
 Зернистость: 125/100
 Температура спекания: 700°C
 Максимальное значение $\sigma_{\text{экв}}$: 2,01 ГПа

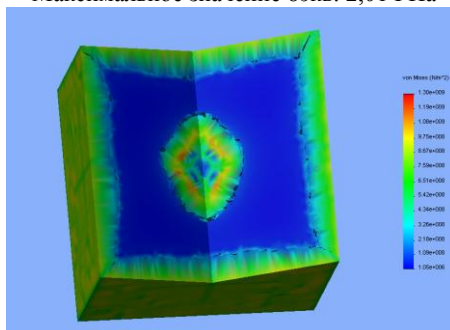
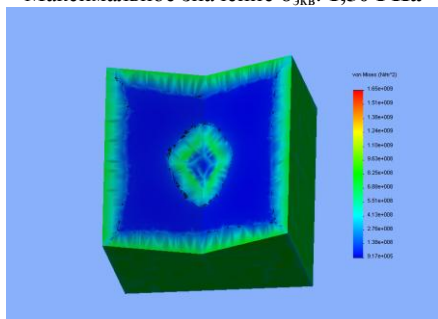


Рисунок 3 – Зависимость эквивалентных напряжений от температуры для кругов на металлических связках

Марка связки: Керамическая
 Марка зерна: AC50
 Зернистость: 125/100
 Температура спекания: **400°C**
 Максимальное значение $\sigma_{\text{экв}}$: **1,50 ГПа**



Марка связки: Керамическая
 Марка зерна: AC50
 Зернистость: 125/100
 Температура спекания: **700°C**
 Максимальное значение $\sigma_{\text{экв}}$: **2,71 ГПа**

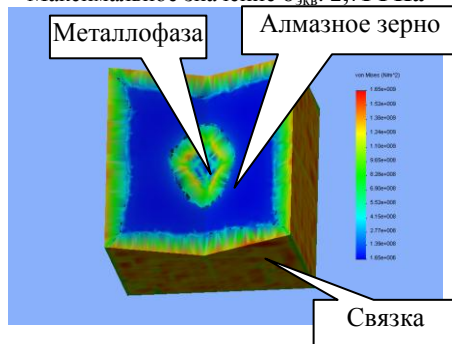


Рисунок 4 – Зависимость эквивалентных напряжений от температуры для кругов на керамических связках

Таблица 1 — Максимальные значения эквивалентных напряжений при различных составляющих системы «связка-металлофаза-зерно» с алмазным зерном AC100 (200/160)

Марка связки	Температура спекания, °C	Марка металла-катализатора			
		Никель	Кобальт	Железо	Медь
		Эквивалентные напряжения, ГПа			
Керамическая	400	1,53	1,34	1,24	1,78
	700	2,76	2,41	2,23	3,20
Титаномагниева	400	1,53	1,16	1,02	1,82
	700	2,76	2,09	1,84	3,27
Алюминиевая	400	1,52	1,32	1,19	1,79
	700	2,74	2,38	2,14	3,23

Изучена роль влияния процентного содержания металлофазы на сохранение целостности алмазного зерна, для чего была построена новая 3D модель «связка – алмазное зерно - металлофаза» с 20% содержанием металла-

катализатора в алмазном зерне AC65. Исходя из полученных результатов, утверждается, что увеличение процентного содержания металлофазы в синтетических алмазах ведет к увеличению величины эквивалентных напряжений в зерне. Изучена роль толщины и материала покрытий алмазного зерна (медь, молибден, натриевборосиликатное стекло) и подтверждено положительное влияние нанесенных покрытий на сохранение целостности алмазного зерна на этапе изготовления алмазного круга (рис.5).

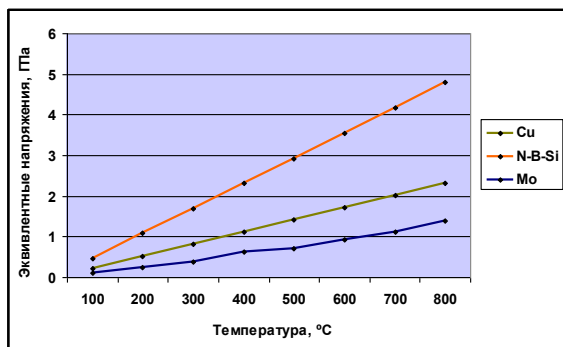


Рисунок 5 — Динамика роста напряжений в системе «зерно–металлофаза–покрытие–связка» с алмазным зерном AC100; толщина покрытия 15 мкм

На втором этапе исследований моделировали процесс эксплуатации алмазных шлифовальных кругов. Изучено влияние присутствия металлофазы в синтетических алмазах при абразивной и лезвийной обработке. Определены максимальные значения эквивалентных напряжений при увеличении усилия прижима шлифовального круга и увеличении температуры в зоне резания.

Моделирование процесса шлифования проводилось по схожей методике указанной в первой части статьи. Использовался программный продукт SolidWorks и CosmosWorks. Была построена 3D-модель «связка – зерно – металлофаза – обрабатываемый материал». В исходной модели была использована керамическая связка, кобальтовая металлофаза (5% от объема алмазного зерна), алмазное зерно и заготовка из алюминия. Заготовка и фрагмент связки представлялись в виде пластин, а алмаз с геометрией октаэдра. В ходе расчетного эксперимента, модель нагружалась нормальной силой от 0,5 до 4 Н, что моделировало усилие прижима алмазного шлифовального круга во время абразивной обработки (рис. 6).

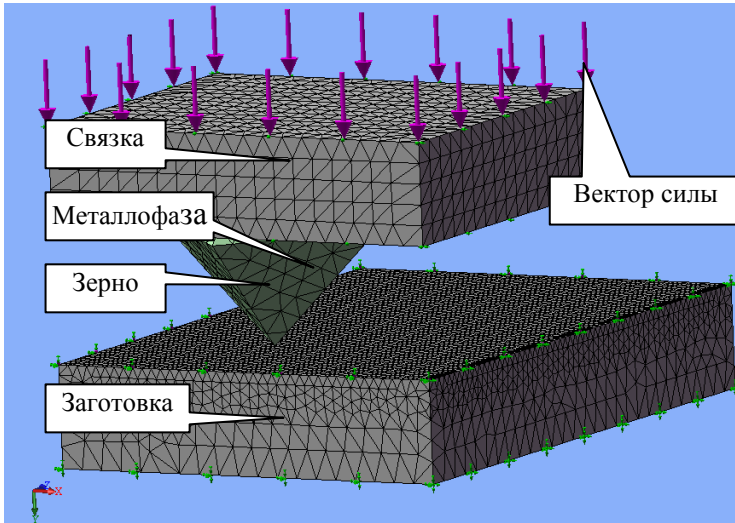
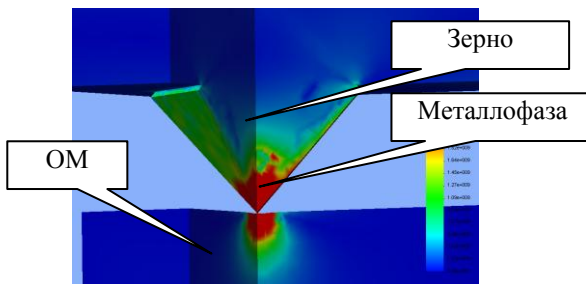


Рисунок 6 — 3D-модель «связка – зерно – металлофаза – заготовка» с конечно-элементной сеткой

Определено значительное влияние температуры в зоне резания на НДС алмазного зерна. Данное явление объяснимо влиянием температурного фактора на поведение металла-катализатора в алмазном зерне. Так, уже при температуре 500°C и усилии прижима 1 Н могут возникать нагрузки на 5 % превышающие максимальное значение напряжений без присутствия повышенных температур. Металл-катализатор обладает значительно большим коэффициентом температурного расширения нежели алмаз, и при увеличении напряжений происходит наложение полей напряжений вызванных силовой и температурной нагрузкой.

Выводы и перспективы развития. Проведение теоретического изучения 3D НДС системы «ОМ - зерно - металлофаза - связка» в специализированном пакете программ CosmosWorks позволило исследовать влияние качественного состава металлофазы на 3D НДС зоны шлифования при высоких температурах, а также рассчитать эквивалентные напряжения в исследуемой системе. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности применения алмазных зерен с минимально возможным содержанием металлофазы, преобладающим элементом, в составе которой должен быть металл с низким коэффициентом теплового расширения. Это позволит значительно увеличить коэффициент использования алмазных зерен и повысить экономичность алмазного шлифования.

Связка: Керамическая
Металлофаза: Медная
ОМ: Al
Усилие прижима: 3 Н
Температура нагрева:
500°C
Значение $\sigma_{\text{экв}} = 17,84$
ГПа



Связка: Керамическая
Металлофаза: Медная
ОМ: Al
Усилие прижима: 3 Н
Температура нагрева:
800°C
Значение $\sigma_{\text{экв}} = 27,92$
ГПа

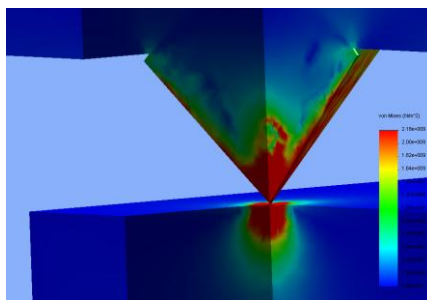


Рисунок 7 — Распределение напряжений при увеличении температуры нагрева алмазного зерна

Список использованных источников: 1. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов.-X.,1980.-192 с. 2. Федорович В.О. Розробка наукових основ та способів практичної реалізації управління пристосовуваністю при алмазному шліфуванні надтвердих матеріалів. Автореф. дис.... докт. техн. наук 05.03.01 – Харків, 2002, 34с. 3. Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. - Киев: Наук. думка, 1993. – 220с. 5. Воронин Г.А., Мальнев В.И., Невструев Г.Ф Влияние включений на прочность синтетических алмазов при высоких температурах // Сверхтвердые материалы. – 1984 - № 2. – С.33-37. 6 Гаргин В.Г. Влияние включений в алмазах на их прочность // Сверхтвердые материалы. – 1983. - № 4. – С. 27-30 7. Казакова Н.В. Визначення раціональних характеристик алмазних кругів шляхом 3D моделювання процесів їх виготовлення і шліфування надтвердих матеріалів. Автореф. дис.... канд. техн. наук 05.03.01 – Харків, 2004, 23с.

Поступила в редколлегию 15.05.2010