

УДК 621.923

Д.О. ФЕДОРЕНКО,

Д.В. РОМАШОВ,

В.А. ФЕДОРОВИЧ, д-р техн. наук, Харків, Україна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ ДЛЯ РАБОТЫ В РЕЖИМЕ САМОЗАТАЧИВАНИЯ

Наведено результати теоретичного моделювання зони спікання алмазоносного шару абразивних інструментів на органічних і керамічних зв'язках. Визначено морфологічні характеристики алмазних кіл, за яких при спіканні формується оптимальна з погляду самозаточування алмазних зерен структура кола.

Представлены результаты теоретического моделирования зоны спекания алмазоносного слоя абразивных инструментов на органических и керамических связках. Определены морфологические характеристики алмазных кругов, при которых при спекании формируется оптимальная с точки зрения самозаточивания алмазных зерен структура круга.

The theoretical modeling results of the diamond layer sintering zone of the abrasive tools on organic and ceramic bonds are presented. The morphological characteristics of diamond wheels, which ensure in sintering the formation of optimal structure in the terms of diamond grain self-sharpening of the grinding wheel, are determined.

Постановка проблеми. При експлуатації абразивного інструмента в результаті износа алмазних зерен і засаливання робочої поверхності круга суттєво зменшується ефективність шліфування кругами на органічних і керамічних зв'язках внаслідок зниження їх режущої здатності. Для відновлення работоспособності абразивного інструмента необхідна правка, здійснювана шляхом примусового видалення оброблених зерен [1]. Проблема підвищення ефективності процесу шліфування алмазними кругами на органічних і керамічних зв'язках є дуже актуальною. Розв'язання даної проблеми можливо при веденні шліфування в режимі самозаточивання круга, при якому штучно створюються умови, ініціюючі

микроразрушение алмазных зерен, исключаящее образование на них площадок износа. Для реализации режима самозатачивания необходимо соблюдение оптимального сочетания прочности алмазных зерен и связки исходя из термосиловых условий нагружения зоны шлифования, возникающих при конкретных режимах обработки [2].

В настоящее время отсутствует научно обоснованная методология прогнозирования оптимального сочетания зернистости концентрации и прочности алмазных зерен, а также свойств связки, позволяющая без длительных, трудоемких и дорогостоящих исследований определять рациональные условия процесса самозатачивания алмазных кругов в процессе шлифования применительно к обработке конкретного обрабатываемого материала. Существующие в литературе рекомендации по выбору характеристик алмазоносного слоя на этапах изготовления алмазных кругов носят общий характер и в силу больших диапазонов варьирования не обеспечивают необходимого результата и, зачастую, приводят к повреждению алмазных зерен в процессе спекания, а в дальнейшем – к низкой производительности самого процесса абразивной обработки [3]. На наш взгляд, решающим фактором в повышении эффективности работы алмазно-абразивных кругов является рациональный выбор их морфологических характеристик в совокупности с научно обоснованным режимом шлифования, что позволит существенно увеличить период эффективной эксплуатации инструмента.

Анализ существующих публикаций. Изготовление алмазно-абразивного инструмента, базируется на установлении физических и технологических закономерностей формирования алмазоносного слоя при спекании. Как известно, рабочий слой шлифовальных кругов представляет собой разновидность композиционных материалов, в которых частицы алмазного порошка (монокристаллы, их осколки и сrostки) равномерно распределены и прочно закреплены в сплошной матрице (связке). Концентрация, марка и зернистость алмазного порошка, а также природа и свойства связки определяют поведение алмазоносного слоя при спекании и шлифовании. Марка алмазного порошка определяется его работоспособностью и эффективностью при выполнении того или иного вида обработки. В виду того, что режущие свойства алмазно-абразивного

інструмента улучшаються с увеличением размеров зерен, а чистота обработки повышается с уменьшением их размеров, зернистость алмазного порошка является важной характеристикой инструмента, правильность выбора которой определяет эффективность его применения [4].

Связка предназначена для закрепления зерен алмазного порошка и наполнителя в алмазоносном слое инструмента. Она должна обладать хорошей смачиваемостью по отношению к алмазу, прочно удерживать алмазные зерна, иметь плотность и коэффициент линейного расширения близкий к таковым свойствам для алмаза, обладать достаточной термостойкостью и теплопроводностью, а также проявлять инертность по отношению к обрабатываемому материалу и охлаждающей жидкости. Для увеличения ресурса работы круга свойства связка должны обеспечивать самозатачивание, способствуя выпадению затупившихся и вскрытию режущих граней новых зерен [5]. К связкам также предъявляется ряд технологических требований. Так, ее температура спекания не должна превышать $800\div 850$ °С и быть минимальной с учетом термостойкости алмазов. Связка должна обладать хорошей адгезией, а также обеспечивать получение рабочего слоя без трещин, сколов и других механических дефектов [6].

В качестве основы органических связок применяют мономеры и олигомеры с различными физико-механическими и физико-химическими свойствами, температурой отверждения и деструкции. Широкое применение для изготовления алмазных инструментов нашли фенолформальдегидный олигомер СФ-012, фенольное связующее СФП-012А, резольная безаммиачная анилин-фенолформальдегидная смола СФ-342 А, а также пульвербакелит. Перспективными связующими алмазно-абразивных композиций являются ароматические полиамиды, полиакрилаты, политриазины, алициклические эпоксидные смолы [5].

Благодаря таким свойствам как износостойкость, теплостойкость, низкий коэффициент трения керамические связки являются перспективными на ряде операций черновой и финишной обработки материалов. Основой керамических связок являются боросиликатные стекла, модифицированные оксидами натрия, свинца, цинка и др. Наибольшее распространение имеют низкотемпературные связки на основе

стекол в системах $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{PbO}-\text{ZnO}-\text{SiO}_2$, $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{PbO}-\text{ZnO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$ и $\text{PbO}-\text{SiO}_2$ [5, 7].

Как известно, самозатачивание алмазного круга обеспечивается при рациональном сочетании процессов микроразрушения зерен и своевременного равномерного удаления затупившихся зерен со шлифующей поверхности круга. Процесс имеет место в том случае, когда из-за затупления зерен давление, действующее на них, превышает прочность удерживающей их связки. Интенсивность самозатачивания зависит от степени сопротивления, оказываемого связкой выкрашиванию зерен. Максимально эффективное использование алмазно-абразивного инструмента наблюдается в том случае, если связка удерживает зерна только до момента потери ими режущей способности [8].

Наиболее полно вопросы практической реализации управления процессами формирования структуры и работы шлифовальных кругов рассмотрены в работах [9–11]. В то же время, результаты полученные авторами и выданные ими рекомендации касаются, в большинстве своем, шлифовальных кругов на металлических связках. Информация о процессах изготовления кругов на органических и керамических связках и шлифования с их использованием, а также механизмах управления этим процессом весьма ограничена.

С появлением программных продуктов *SolidWorks*, *CosmosWorks*, *ABAQUS*, *ANSYS*, *LS-Dyna*, *NOSTRAN* и др., реализующих метод конечных элементов (МКЭ), перед исследователями открылись новые возможности для изучения НДС алмазных кругов как при их формировании в процессе спекания, так и при шлифовании. Сведения, полученные авторами [12–14], а также разработанная нами методология 3D моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны шлифования СТМ [15] позволила осуществить моделирование и оптимизацию указанных процессов.

Цель исследований. Задачей настоящих исследований является моделирование процесса спекания алмазных кругов и определение их оптимальных характеристик, обеспечивающих реализацию их самозатачивания, и, как следствие, повышение эффективности эксплуатации абразивного инструмента.

Методика досліджень. Как было показано выше, процесс самозатачивания обеспечивается соответствующими параметрами напряженно-деформированного состояния элементов зоны шлифования. Для сокращения длительных и трудоемких экспериментальных исследований проведено теоретическое моделирование процесса спекания алмазосносного слоя шлифовального круга путем анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) системы " связка – покрытие – алмазное зерно – металлофаза " с использованием метода конечных элементов. В данной работе для моделирования процесса спекания алмазно-абразивного инструмента с целью определения оптимального сочетания компонентов в спекаемом алмазосносном слое шлифовальных кругов использовался программный комплекс *ABAQUS*, предназначенный для исследовательских расчетов с применением метода конечных элементов.

Для проектирования 3D моделей фрагмента алмазосносного слоя применялся программный пакет *SolidWorks*. Абразивное зерно имело геометрию октаэдра, было рассмотрено три группы зернистостей 50×40 мкм, 100×80 мкм, 200×160 мкм. С целью отражения особенностей марки алмазного порошка в зерне была смоделирована металлофаза призматической формы, размер которой составлял от 0,1 до 10 % объема зерна в зависимости от его марки. Связка, моделировалась в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами от 500×500×250 мкм до 1000×1000×500 мкм. В объеме связки в произвольном порядке размещались посадочные поверхности под абразивные зерна, количество которых варьировалось в зависимости от задаваемой концентрации алмазных зерен. Концентрация задавалась как процентное отношение объема связки и общего объема зерен и составляла от 25 до 5 %. Для воспроизведения структуры круга в теле связки были созданы поры сложной геометрической формы. Принцип построения геометрической 3D модели фрагмента алмазосносного слоя круга, а также составляющие компоненты представлены на рис. 1.

Наиболее важным параметром, определяющим целостность алмазных зерен в процессе спекания кругов, является их прочность. Поскольку в процессе изготовления кругов температура спекания составляет от 200÷300 °С (при использовании органических связок) до 400÷700 °С (для керамических связок на основе стекол систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ и

PbO–B₂O₃–SiO₂) [16], сделан вывод о необходимости рассмотрения как физико-механических, так и теплофизических свойств компонентов исследуемой системы. На рис. 2 представлены сведения о температурной зависимости свойств синтетического алмаза по данным работы [17], которые были использованы нами при анализе модели процесса спекания кругов.

Температурные условия изготовления алмазно-абразивного инструмента оказывают существенное влияние на состояние металла-катализатора синтетического алмаза, следствием чего является растрескивание алмазного зерна. В связи с этим при моделировании процесса спекания нами учитывались физико-механические и теплофизические свойства металлов применяемых в качестве катализаторов при синтезе алмазных зерен.

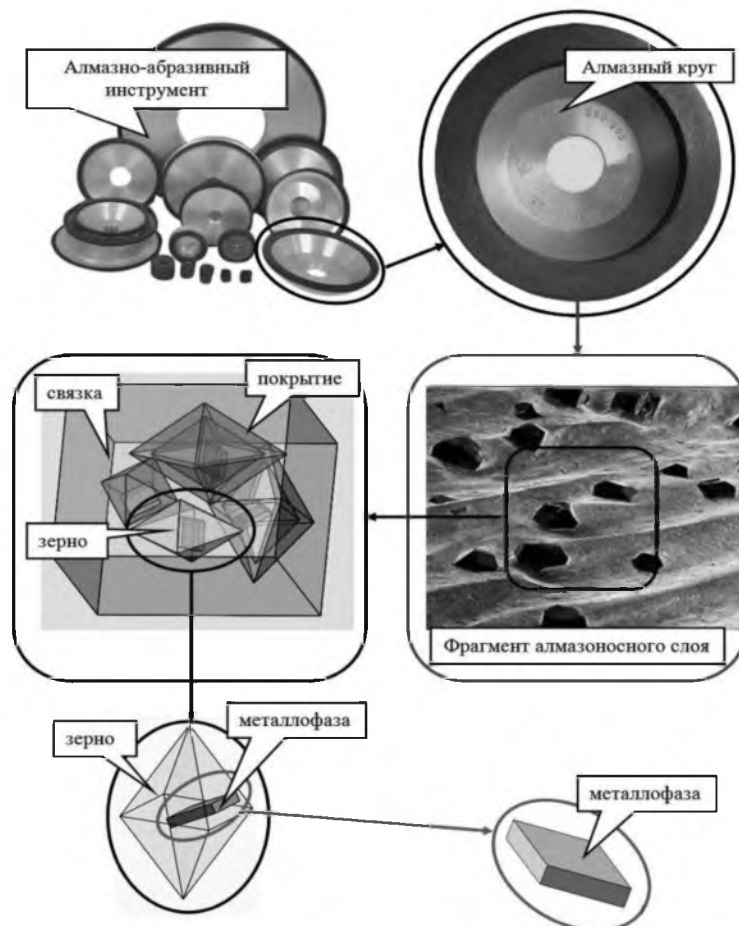


Рисунок 1 – 3D модель фрагмента алмазоносного слоя, составляющие компоненты и принципы проектирования

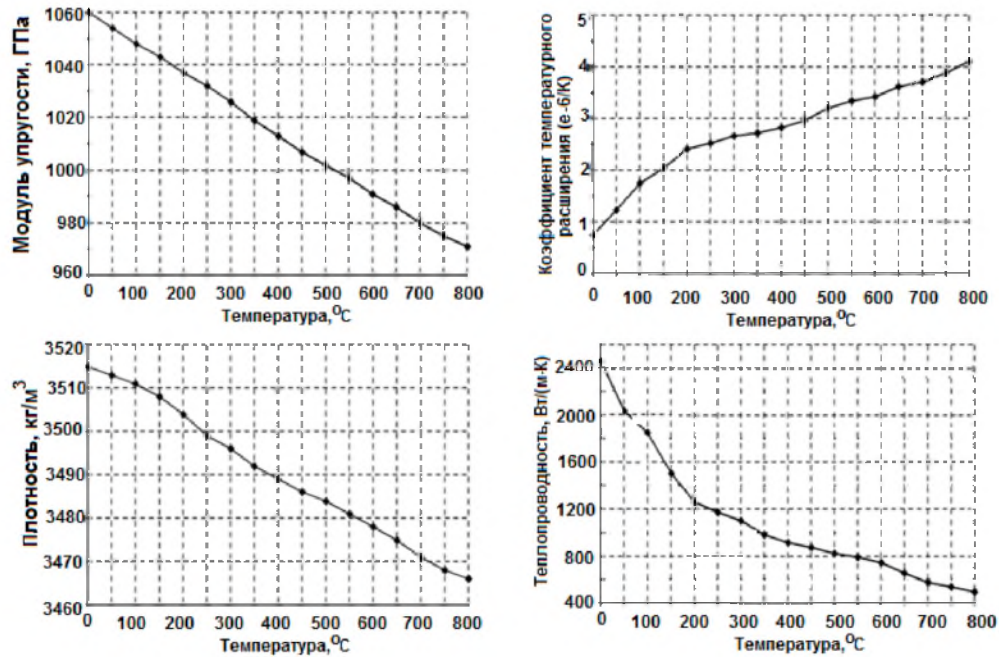


Рисунок 2 – Температурные зависимости свойств синтетического алмаза

Такой подход позволил повысить адекватность модельных экспериментов. В качестве металлофазы, как составляющей исследуемой системы, рассматривали наиболее часто встречающиеся железо, никель и медь. Характер температурных изменений их плотности, коэффициента теплового расширения (КТР), теплопроводности и модуля упругости по данным работ [18-22] представлен в табл.1. Использование этих данных при моделировании процесса спекания позволило получить более точные сведения о распределении напряжений в алмазном зерне при наличии металлофазы различной природы и разных тепловых и механических нагрузках, возникающих при шлифовании, по сравнению с результатами модельных исследований в данной области, полученными ранее [3, 9, 10, 14].

На следующем этапе моделирования произведен выбор граничных условий нагружения модели. Закрепление конечно-элементной модели (задание нулевых или других необходимых перемещений) осуществлялось с использованием атрибутов геометрической модели (точки, линии, поверхности). Давление, прикладываемое к модели, варьировалось в пределах 150÷200 МПа; температура изменялась от 200 до 800 °С, что соответствует условиям производства алмазно-абразивного инструмента. При построении конечно-элементной сетки модели осуществляли ее селективное сгущение в

области включений металлофаз. При создании сетки для металлофаз были использованы элементы типа *Hex Dominant*; при генерировании сетки для области связки и алмазных зерен применялись элементы *Tetrahedron*.

Таблица 1 – Свойства металлофазы разного состава

Температура °С	Модуль упругости, ГПа	Теплопроводность, Вт/(м·К)	КТР, 1/К	Плотность, кг/м ³
Свойства железа [18]				
20	214,952	68,9	0,719E-005	8251
50	212,365	65,6	1,036E-005	8126
100	209,853	63,5	1,191E-005	7983
200	202,407	61,8	1,241E-005	7810
300	194,219	55,1	1,281E-005	7770
400	185,290	48,7	1,326E-005	7730
500	175,621	42,7	1,354E-005	7700
600	165,210	37,2	1,358E-005	7660
700	154,059	32,0	1,396E-005	7620
800	142,166	30,2	1,465E-005	7590
900	135,584	27,9	0,719E-005	7440
Свойства никеля [19, 20]				
20	273,3	78,2	1,30 E-005	8986
100	268,3	73,8	1,40 E-005	8890
200	261,6	72,1	1,50 E-005	8820
300	253,4	63,3	1,70 E-005	8780
400	243,9	60,9	1,60 E-005	8740
500	233,0	64,3	1,75 E-005	8690
600	220,9	66,2	1,80 E-005	8650
700	208,0	71,5	1,90 E-005	8600
800	194,1	75,6	1,93 E-005	8500
900	179,8	76,8	1,98 E-005	8420
Свойства меди [21, 22]				
20	128,3	398,4	1.30 E-005	8785
100	120,2	390,1	1.40 E-005	8694
200	115,8	385,4	1.50E-005	8628
300	110,5	376,9	1.76 E-005	8779
400	102,6	369,7	1.77 E-005	8728
500	96,5	360,8	2.00 E-005	8656
600	89,4	355,3	2.10 E-005	8622
700	84,7	349,2	3.18 E-005	8567
800	76,9	337,6	3.20 E-005	8509
900	74,5	334,5	3.80 E-005	8450

3D модель системи "связка – покрытие – алмазное зерно – металлофаза" с граничными условиями, температурным и силовым нагружением, а также конечно-элементная модель представлена на рис. 3.

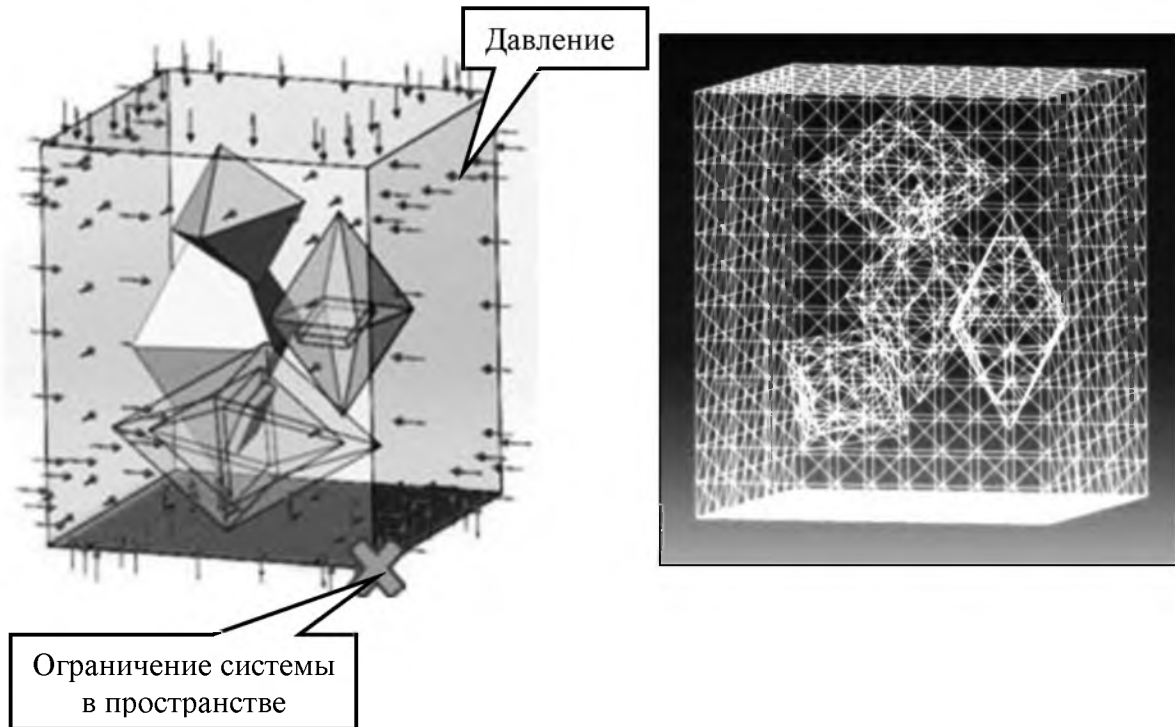


Рисунок 3 – Конечно-элементная 3D модель системы "связка – покрытие – алмазное зерно – металлофаза"

Обсуждение результатов. Путем варьирования марки алмазных зерен, их зернистости и концентрации в круге для случаев использования органических и керамических связок при имитации процесса спекания алмазного круга определялось такое сочетание его морфологических характеристик, при котором обеспечивается сохранение целостности алмазных зерен в условиях задаваемых температурных и силовых нагрузок.

Проведенные теоретические исследования показали, что температура спекания алмазоносного слоя, в отличие от давления, оказывает наибольшее влияние на НДС системы "связка – покрытие – алмазное зерно – металлофаза", независимо от вида связки. Установлено, что при использовании органических связок даже в случае применения алмазных порошков марок AC2, AC4, обладающих наименее низкой прочностью, возникающие напряжения не

достигают уровня, при котором происходит разрушение зерен. Это объясняется тем, что верхний предел температур при производстве кругов на органических связках не превышает 250 °С. Показано, что концентрация и зернистость алмазов не влияет на их целостность при спекании композита, что обусловлено поглощением напряжений связующим веществом, обладающим определенной пластичностью. В связи с этим сделан вывод о том, что использование покрытий на абразивных зернах в композициях на органической связке не целесообразно.

На рис. 4 показаны эпюры распределения НДС в исследуемой системе для наиболее и наименее благоприятных вариантов сочетания характеристик компонентов при спекании композиции при температуре 250°С и давлении 200 МПа.

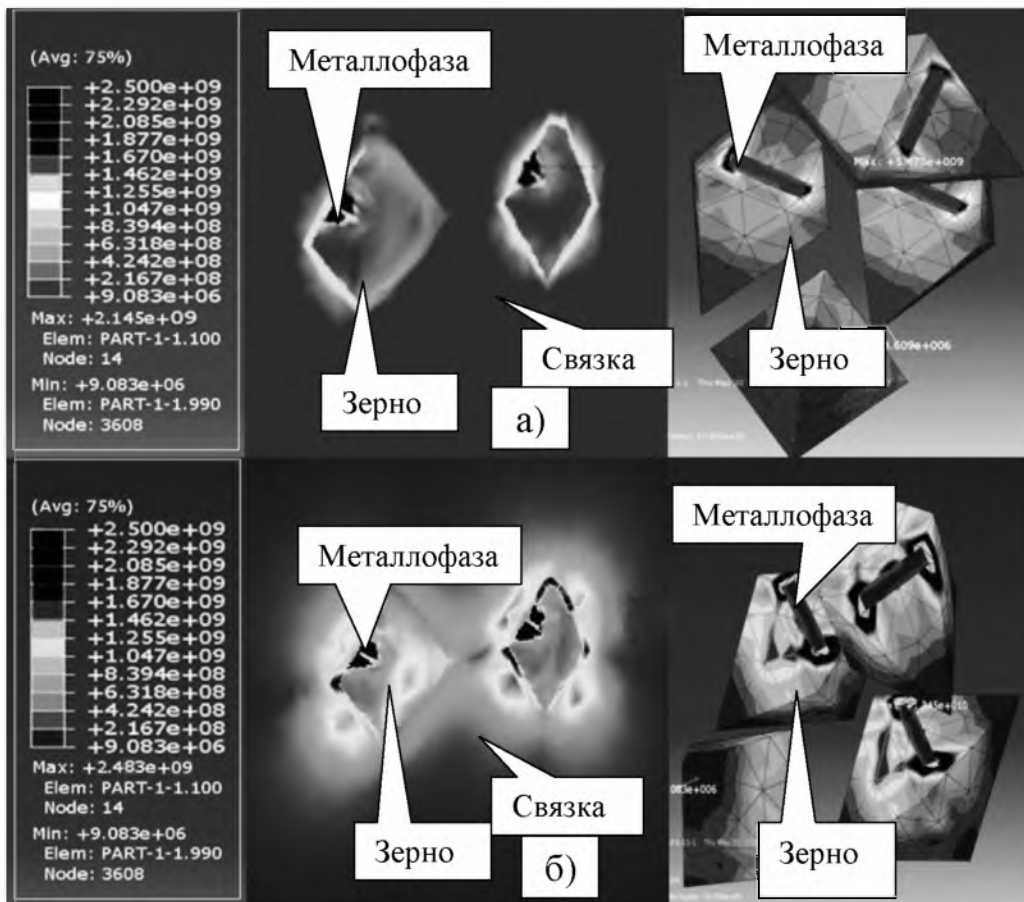


Рисунок 4 – Эпюры распределения НДС в системе "связка – покрытие – алмазное зерно – металлофаза":

а) максимальные напряжения 2,14 ГПа, б) максимальные напряжения 2,48 ГПа

На рис. 4а представлены эпюры для модели композита, содержащего алмазные зерна марки АС4 в концентрации 100 %, металлофазу на основе железа и бакелитовую связку марки Б. Такое сочетание характеристик круга обеспечивает минимальный уровень возникающих напряжений (2,14 ГПа). На рис. 4б показаны эпюры модели композита на основе бакелитовой связки марки Б1, с концентрацией алмазных зерен марки АС2 100 %, содержащих металлофазу на основе меди. Для данного случая уровень возникающих напряжений не превышает 2,48 ГПа, что обеспечит целостность алмазных зерен при спекании алмазного круга.

При использовании керамических связок и зерен марки АС2, как наименее прочных, в ряде случаев возникали напряжения превышающие предел прочности алмаза. Это является следствием того, что верхний предел температур при спекании кругов на некоторых керамических связках может достигать 700 °С. Как известно, спекание осуществляется в интервале температур размягчения по Литтлону (T_p) и полного плавления ($T_{ликв}$) стеклокомпозиции [5]. Анализ имеющихся сведений [16, 22] показал, что температура ликвидуса систем $PbO - SiO_2$, $Na_2O - PbO - SiO_2$, $Na_2O - B_2O_3 - SiO_2$, используемых для синтеза легкоплавких стекол, составляет 714÷732 °С, 570÷685 °С и 520÷740 °С соответственно (в зависимости от состава).

На рисунке 5 приведены эпюры распределения НДС в исследуемой системе для наиболее и наименее благоприятных вариантов сочетания характеристик компонентов композиции при температуре 700 °С и давлении 200 МПа. На рис. 5а представлены эпюры для модели фрагмента алмазоносного слоя, содержащего зерна марки АС4 при 100-й % концентрации, металлофазу на основе железа и керамическую связку на основе стекла следующего состава, масс. %: $Na_2O - 8,5$ %, $PbO - 29,2$ %, $SiO_2 - 62,3$ % с $T_{ликв} = 570$ °С и $KTP = 11,71 \cdot 10^{-6}$ 1/К. На рис. 5б показаны эпюры модели фрагмента круга, содержащего алмазные зерна марки АС2 в концентрации 100 %, с металлофазой на основе меди и керамической связку, включающую стекло такого состава, масс. %: $Na_2O - 49,0$, $B_2O_3 - 23,5$, $SiO_2 - 27,5$ с $T_{ликв} = 835$ °С и $KTP = 18,5 \cdot 10^{-6}$ 1/К. В данном случае возникающие максимальные напряжения превышают допустимый уровень, при котором начинается разрушение алмазных зерен (7 ГПа).

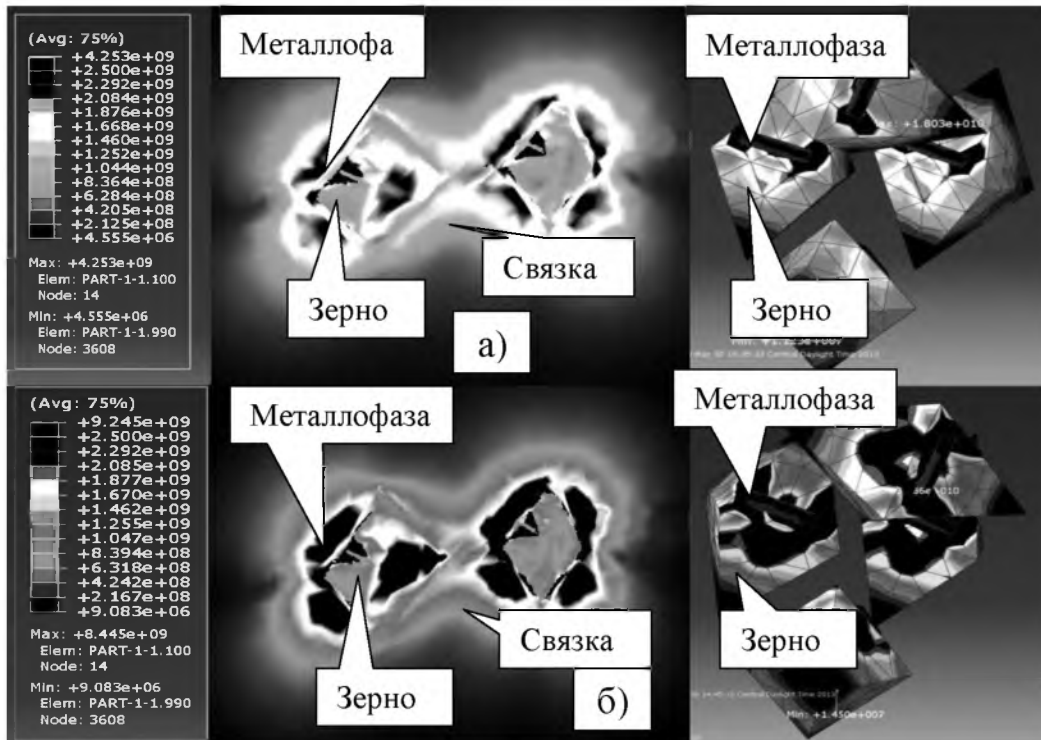


Рисунок 5 – Эпюры распределения НДС в системе "связка – покрытие – алмазное зерно – металлофаза":

а) максимальные напряжения 4,25 ГПа, б) максимальные напряжения 8,44 ГПа

Анализ полученных данных свидетельствует о необходимости обоснованного выбора состава стеклокомпонента керамической связки как с позиций его теплофизических характеристик. Установлено, что при высоких температурах, характерных для процесса спекания алмазных кругов на керамических связках, преимущественное влияние на НДС системы оказывают два фактора: марка алмазного зерна, характеризующая вид, свойства и процентное содержание металла-катализатора, а также состав стеклокомпонента керамической связки, который определяет выбор температуры спекания круга и, как следствие, обуславливает уровень возникающих термических напряжений в системе.

Показано также, что для алмазных композитов на керамической связке влияние концентрации зерен на НДС зоны весьма существенно. Так, при увеличении концентрации с 50 до 100 %, эквивалентные напряжения в системе возрастают на 5÷10 % в зависимости от используемой марки алмазного порошка. При необходимости увеличения концентрации

возможно применение зерен с покрытием на основе никеля, которое способствует уменьшению эквивалентных напряжений в среднем на 15 %.

Выводы. Анализ 3D НДС системы "связка – покрытие – алмазное зерно – металлофаза" позволил определить наиболее рациональные характеристики алмазосодержащего композита на органических и керамических связках с точки зрения сохранения целостности алмазных зерен при спекании и реализации режима самозатачивания при эксплуатации абразивного инструмента. Показано, что синтез покрытий на алмазных зернах в композициях на органической связке не целесообразен, поскольку уровень напряжений возникающих при их спекании не вызывает разрушения зерен абразива. При спекании кругов на керамических связках необходим обоснованный выбор стеклокомпонента, который существенно влияет на уровень возникающих термических напряжений, и, также как и марка алмазов, определяет условия эффективного и качественного спекания шлифовальных кругов.

Установлены оптимальные сочетания прочности связки и марки алмазных зерен при их предельно допустимой концентрации, обеспечивающие сохранение целостности зерен при спекании в процессе изготовления алмазных кругов. Рекомендуемые морфологические характеристики алмазных кругов должны быть уточнены для процесса алмазного шлифования в зависимости от прочностных свойств обрабатываемого материала.

Список использованных источников: 1. Белов С.Г. Правка шлифовальных кругов как способ повышения эффективности абразивной обработки / С.Г. Белов, Л.П. Калафатова // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. трудов. – Краматорск: Изд-во ДГМА, 2004. – Вып. 15. – С. 78–84. 2. Худобин Л.В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с. 3. Грабченко А.И. Моделирование процесса определения оптимальных характеристик алмазно-абразивного инструмента / А.И. Грабченко, В.А. Федорович, В.В. Русанов // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. трудов. – Краматорск: Изд-во ДГМА, 2004. – Вып. 15. – С. 229–234. 4. Алексеев Н.С. Влияние абразивного материала на некоторые показатели шлифования / Н.С. Алексеев // Известия вузов. Машиностроение. – 2002. – № 2 – 3. – С. 99–105. 5. Сверхтвердые материалы. Получение и применение : монография в 6 томах. Т. 3 Композиционные инструментальные материалы [А.Е. Шило, Е.К. Бондарев, С.А. Кухаренко и др.]. – К.: ИСМ

им. В.И.Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2005. – 280 с. **6. Веткас Н.И.** Стойкость композиционных шлифовальных кругов / Н.И. Веткас // Вестник СГТУ. – 2004. – № 2. – С. 44–51. **7. Mastuygin L.I.** Using a diamond tool with a ceramic binder / L.I. Mastuygin, V.V. Moroz, A.V. Katyuk // J. Optic.Tech. – 1994. – 61, № 2. – P. 165–166. **8. Мишаевский Л.Л.** Износ шлифовальных кругов. – Киев: Наукова думка, 1982. – 192 с. **9. 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, 23 с. **10. 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, 34 с. **11. Філімонов Є.В.** Прогнозування робочих характеристик абразивних інструментів на основі статистичного моделювання їх структури. Автореф. дис... канд. техн. наук 05.03.01 – Харків, 2008, 20 с. **12. Pawar P.J.; Rao R.V.; Davim J.P.** Multiobjective optimization of grinding process parameters using particle swarm optimization algorithm. *Materials and Manufacturing Processes*, 2010. – V. 25, P. 424 – 431. **13. Maity S.-R., Chakraborty Sh.** Grinding Wheel Abrasive Material Selection Using Fuzzy TOPSIS Method // *Materials and manufacturing process*. – 2013. – 28. – PP. 408-417. **14. Грабченко А.И., Федорович В.А.** Методология 3D моделирования при определении оптимальных характеристик алмазных кругов на этапе изготовления // *Инструмент и технологии*. – 2004. – №17 – 18. – С. 51 – 54. **15. Федоренко Д.О.** Разработка методологии 3D моделирования процесса шлифования в режиме самозатачивания / [Д.О. Федоренко, Д.В.Ромашов, В.А. Фадеев и др.] // *Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць*. – Харків : НТУ «ХП», 2011. – Вип. 6. – С. 135 – 140. **16.** Диаграммы состояния силикатных систем. Тройные системы: Справочник / [В.П. Барзаковский, В.В.Латин, А.И. Бойкова и др.]. – Л.: Наука, 1974. – 514 с. **17.** Synthetic SVD diamond. [Электронный ресурс] – Назв. с титул. экрана. – Режим доступа: <http://www.e6cvd.com/cvd/page.jsp?pageid=349#2>. **18. Birol Y.** Thermal fatigue testing of Inconel 617 and Stellite 6 alloys as potential tooling materials for thixoforming of steels // *Materials Science and Engineering*, 2010. – A 527. – PP.1938-1945. **19. Бадамшин И.Х.** Температурная зависимость модуля упругости интерметаллидов TiAl и Ni3Al – основных компонентов сплавов лопаток газовых турбин / И.Х. Бадамшин, О.И. Кусова // *Вестник УГАТУ*, 2012. – Т. 16. – № 5 (50). – С. 41 – 43. **20. Karimiy M.** Temperature dependence of the elastic constants of Ni: reliability of EAM in predicting thermal properties / [M. Karimiy, G. Stapan, T.Kaplanz and M.Mostollerz] // *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, 1997. – № 5. – PP. 337–346. **21. Qiuping B.** Vibrational and thermodynamic properties of metals from a model embedded-atom potential / B.Qiuping, S.Bose, R.Shukla // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2008. – № 69. – PP. 168–181. **22. Ledbetter H.M.** Elastic Properties of Metals and Alloys. II Copper / H.M. Ledbetter, E.R. Naimon // *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1974. – Vol.3. – № 4. – PP. 897-935. **23.** Phase Equilibrium Diagrams of Oxide Systems NIST Standart Reference Database 31 vol. 01. [Электронный ресурс]. – ACerS–NIST Phase Equilibrium Diagrams CD-ROM Database v. 3.0.1, 2006. – Назв. с титул. экрана. – ISBN 0-916094-04-9