

## УДК 621.923

**А.И. Грабченко,**

д.т.н., профессор,  
Национальный  
технический университет  
«Харьковский политехниче-  
ский институт»  
grabchenko@kpi.kharkov.ua

**В.А. Федорович,**

д.т.н., профессор,  
Национальный  
технический университет  
«Харьковский политехнический  
институт»  
fedorovich@kpi.kharkov.ua

**И.Н. Пыжов,**

д.т.н., профессор,  
Национальный  
технический университет  
«Харьковский политехниче-  
ский институт»  
diamet@inbox.ru

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

*А.И. Грабченко, В.А. Федорович, И.Н. Пыжов. Оптимизация результатов 3D моделирования процесса спекания алмазно-абразивных инструментов.* Приведены результаты 3D моделирования процесса спекания алмазно-абразивного инструмента. Установлены оптимальные условия, при которых обеспечивается целостность алмазных зерен в алмазоносном слое при воздействии на них достаточно высоких значений сил и температуры.

*A.I. Grabchenko, V.A. Fedorovich, I.N. Pyzhov. Optimization of 3D simulation results for sintering process of diamond-abrasive tools.* The results of 3D simulation of sintering diamond-abrasive tools are given. The optimal conditions under which the integrity of the diamond grains in the diamond-bearing layer is provided under the influence of sufficiently high load and temperature are determined.

**Вступление.** Шлифование алмазными кругами на протяжении нескольких десятилетий остается одним из наиболее эффективных прецизионных методов обработки изделий из твердых сплавов, керамики, стекла, сверхтвердых и др. материалов. При этом большая часть алмазно-абразивных инструментов изготавливаются на полимерных органических связках, характерной особенностью которых является способность к самозатачиванию, простота в изготовлении и относительно невысокая стоимость. Наряду с этим, способность к повышенному самозатачиванию приводит в ряде случаев к повышенному удельному расходу алмазных зерен, а, следовательно, к удорожанию процесса шлифования. В связи с этим можно ожидать, что путем рационального выбора компонентов алмазоносного слоя и их свойств удастся полнее использовать потенциально высокий режущий ресурс дорогостоящих алмазных зерен и таким образом увеличить работоспособность алмазоносного слоя

в целом, что положительно скажется на характеристиках качества обрабатываемых изделий.

Анализ результатов уже выполненных теоретических и экспериментальных исследований в направлении повышения эффективности алмазно-абразивной обработки свидетельствуют об эффективности подхода основанного на использовании моделирования [1-4].

Однако анализ литературных источников показал, что на настоящий момент практически отсутствуют разработки по моделированию процессов спекания алмазоносных слоев кругов. А они на наш взгляд должны позволить определять рациональные условия, обуславливающие степень самозатачивания алмазных кругов при шлифовании, и таким образом до минимума сократить число длительных, трудоемких, а, следовательно, и дорогостоящих экспериментальных исследований.

В задачу настоящих исследований входило изучение влияния прочностных характеристик связки, покрытий, температуры спекания, а также качественного и количественного состава металлофазы на напряженно деформированное состояние (НДС) зоны спекания алмазоносного слоя. Целью исследования является совершенствование процесса изготовления алмазного шлифовального инструмента на органических и керамических связках путем подбора рациональной структуры и физико-механических свойств алмазоносного слоя на этапе его спекания.

**Основные материалы исследований.** При проведении исследований были использованы современные методы проведения модельных экспериментов. В частности в основу прогнозирования эксплуатационных характеристик был положен метод конечных элементов (МКЭ). Для решения поставленных задач в работе применялись такие известные новейшие аналитические CAD/CAE- комплексы как SolidWorks, CosmosWorks, ANSYS.

Технология изготовления алмазоносного слоя как для кругов на органической, так и керамической связках, включает этап спекания, который зачастую сопровождается высокими температурами и давлениями. Для анализа и прогнозирования НДС зоны спекания, была разработана методика трехмерного конечно-элементного моделирования системы «связка–зерно–металлофаза». Она включала в себя, в том числе и этап создания твердотельной 3D модели, которая была выполнена в программном пакете SolidWorks.

На первом этапе был теоретически исследована и проанализирована возможность реализации процесса разрушения алмазных зерен на этапе изготовления алмазоносного слоя кругов. Разработанная 3D CAD модель «связка–зерно–металлофаза», позволяла рассчитывать главные, касательные и эквивалентные напряжения в каждом элементе системы при определенных значениях температурной или силовой нагрузки (рис. 1).

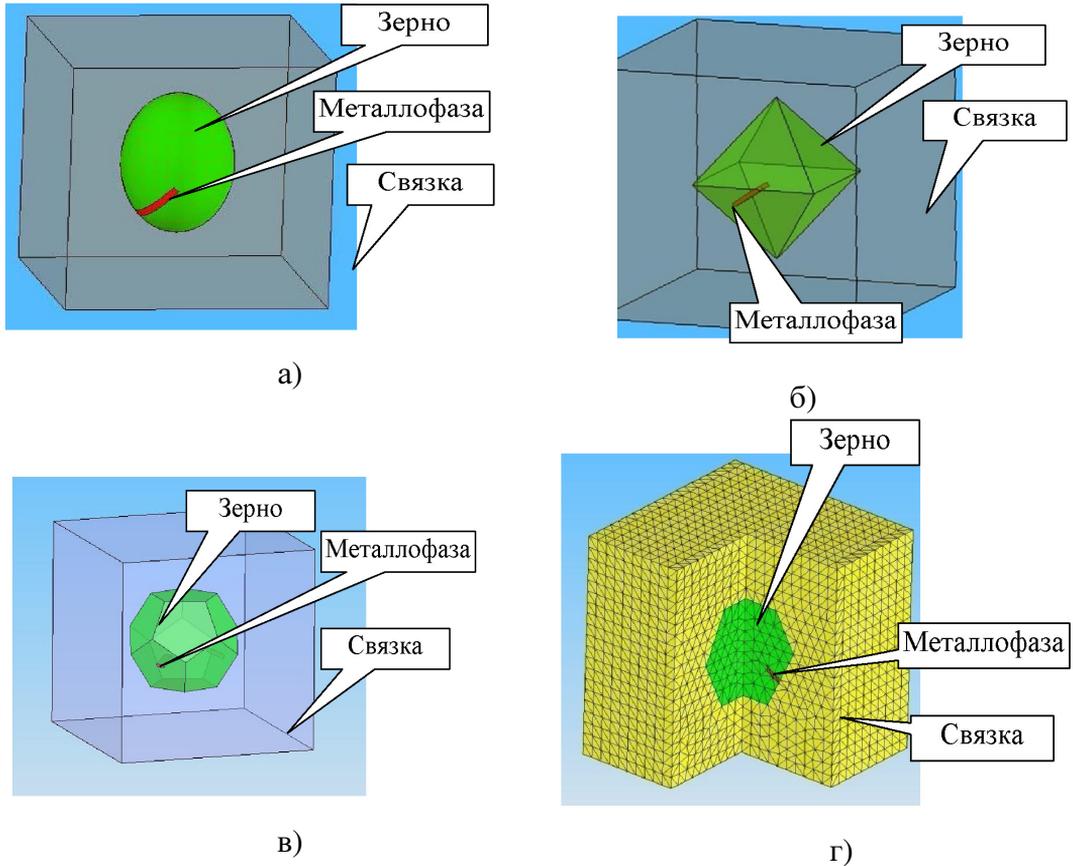


Рис. 1.-3D CAD модель системи «связка-зерно-металлофаза» с различной формой алмазных зерен

Полученные эквивалентные напряжения  $\sigma_{\text{экв.мах}}$  сравнивались с их допустимыми значениями для анализируемого элемента системы и на этой основе делалось заключение о возможности его разрушения.

При моделировании температурную нагрузку и давление меняли в пределах 100-900°C и 30-120 МПа соответственно (круги на керамических связках). Расчеты показали, что предельные значения эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв.мах}}$  в алмазных зернах, просчитанные согласно теории Мора-Кулона, могут превышать допустимые значения, что говорит о возможности их разрушения или растрескивания во время спекания алмазного слоя. Поэтому изучение влияния такого фактора, как наличие металла-катализатора на термостойкость зерен имеет определяющее значение ибо согласно картинам распределения напряжений в 3D-модели, именно на границе «зерно-металлофаза» возникают наибольшие значения приведенных напряжений.

Моделирование процесса спекания фрагмента алмазонасного слоя на основе керамики (система «связка–зерно–металлофаза», связка К1-01, алмазное зерно АС32 зернистостью 100/80, состав металлофазы Ni48Fe48(Cr3C2)4) при различных температурных режимах и физико-механических свойствах металлофазы, показало прямую зависимость между содержанием металлофазы в зерне и максимальными значениями эквивалентных напряжений в изучаемом фрагменте алмазонасного слоя (рис. 2).

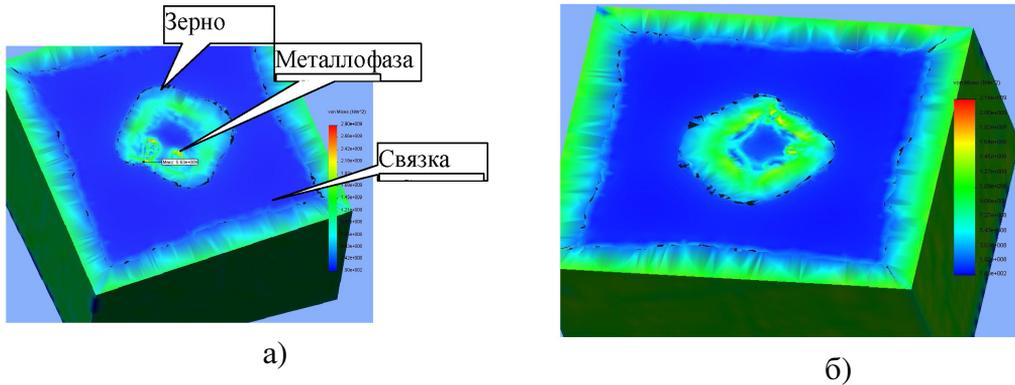


Рис. 2.-Распределение напряжений в системе «связка-зерно-металлофаза» при различных температурах спекания.  
а)-T=400°C;  $\sigma_{\text{экв. max}}=0,29$  ГПа; б)-T=700°C;  $\sigma_{\text{экв. max}}=0,75$  ГПа

Для получения математической модели процесса изготовления алмазных кругов был использован метод многофакторного планируемого эксперимента (план типа В4). Общий вид математической модели имел вид:

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{i,j} X_i X_j + \sum b_{ii} X_i^2 + \dots,$$

где  $X$ –независимые переменные (факторы);  $Y$ – параметр оптимизации (отклик);  $b$ –коэффициенты, определяемые расчетным путем.

В таблице приведены значения и принятые уровни независимых факторов, влияющих на процесс изготовления алмазных кругов. В качестве таковых были приняты: коэффициент теплового расширения (КТР) металлофазы ( $\alpha$ ), модуль упругости связки ( $\mu_{\text{св.}}$ ), модуль упругости покрытия ( $\mu_{\text{покр.}}$ ), температура спекания ( $T$ ).

Таблица. Уровни варьирования факторов

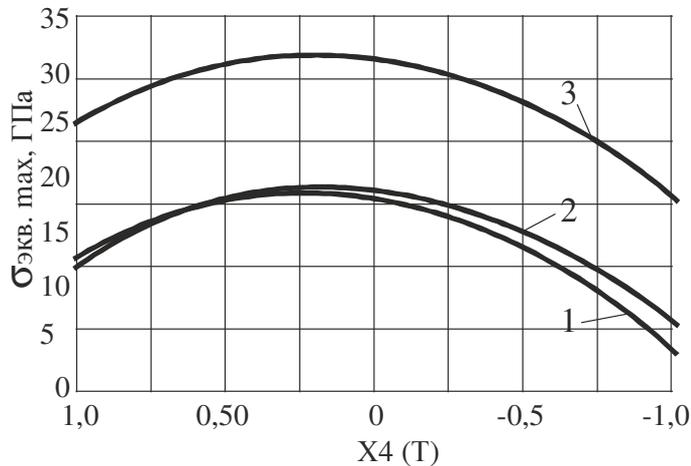
Уровни варьирования	Факторы			
	$\alpha, K^{-1}$ (X1)	$\mu_{св.}, Н/М^2$ (X2)	$\mu_{покр.}, Н/М^2$ (X3)	T, °C (X4)
Верхний (+1)	1,7e-05	6,9e+011	9,00e+011	800
Основной (0)	1,1e-05	4,4e+011	5,05e+011	600
Нижний (-1)	0,5e-05	1,9e+011	1,10e+011	400

С использованием выбранных факторов была проведена серия модельных экспериментов по спеканию алмазосодержащего слоя, в результате которых получены эпюры распределения полей напряжений и деформаций в зоне спекания.

Обработка результатов планируемого эксперимента позволила получить математическую модель (в кодированном виде), адекватно описывающую процесс спекания шлифовальных кругов в представленном диапазоне варьирования независимых факторов. Она имеет вид:

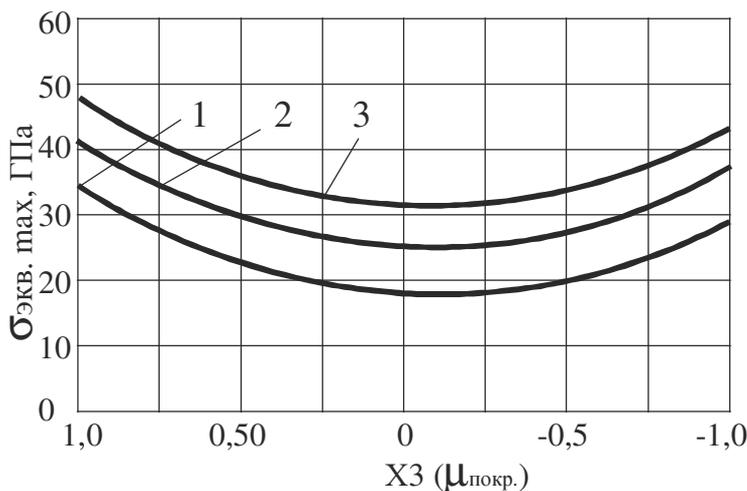
$$Y = 31,10 - 0,40 \cdot X_1 - 0,17 \cdot X_2 - 2,29 \cdot X_3 - 3,60 \cdot X_4 + 8,54 \cdot X_1 X_2 + 0,85 \cdot X_1 X_3 + 0,84 \cdot X_1 X_4 + 0,61 X_2 X_3 + 1,60 X_2 X_4 + 0,38 X_3 X_4 - 12,89 \cdot X_1^2 - 8,60 \cdot X_2^2 + 14,50 X_3^2 - 10,03 \cdot X_4^2.$$

На рисунке 3 представлены зависимости напряжений, возникающих в системе «зерно–связка–металлофаза–покрытие», от температуры спекания, КТР металлофазы, определяемой маркой алмазных зерен, и модуля упругости покрытия.



а)

$$1 - \alpha = 0,5e-05 K^{-1}; 2 \alpha = 1,1e-05 K^{-1}; 3 \alpha = 1,7e-05 K^{-1}$$



б)

1 - T=400°C; 2 - T=600°C; 3 - T=800°C

Рис. 3.-Зависимости  $\sigma_{экв. max} = f(T, \alpha)$  (а) и  $\sigma_{экв. max} = f(\mu_{покр.}, T)$  (б)

Ети данні свідчать про те, що при КТР металофази  $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-5} \cdot K^{-1}$  напруження в системі мінімальні. Збільшення КТР металофази в діапазоні  $\alpha = (0,5 - 1,7) \cdot 10^{-5} K^{-1}$  приводить до росту напружень до 2,5 раз. Візуалізація полів напружень для випадків їх мінімального і максимального рівня в зоні спекання показана на рисунку 4.

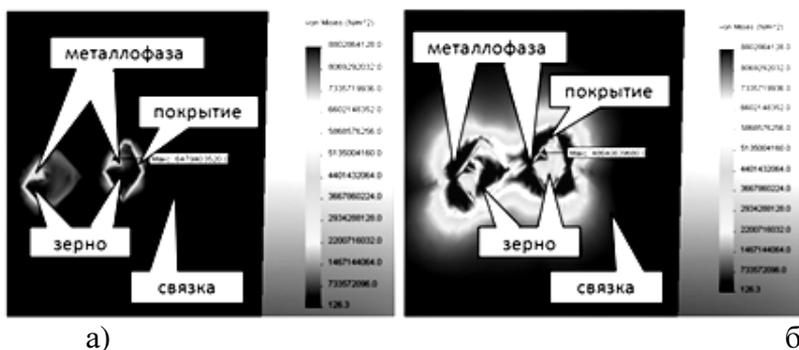


Рис. 4.-Поля напружень в системі «связка-зерно-металлофаза»  
 а)-  $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-5} \cdot K^{-1}$ ; б)-  $\alpha = 1,7 \cdot 10^{-5} K^{-1}$

Оптимізація процесу спекання алмазних кругів з використанням приведеної вище регресійної моделі, виконана в програмному пакеті Maple 14 дозволила установити оптимальні значення факторів в кодированном виде (после округления): X1=-0,09; X2=-0,11; X3=-1,00; X4=-0,21.

При этом максимальные напряжения будут равны  $\sigma_{\text{экв. max}}=48,39$  ГПа.

Если перевести факторы в натуральные значения, то получим, что оптимальное значение КТР металлофазы должно быть равно  $\alpha=1,05e-05$  К<sup>-1</sup>, модуля упругости связки  $\mu_{\text{св.}}=415$  ГПа, модуля упругости покрытия  $\mu_{\text{покр.}}=101$  ГПа, а температуры спекания  $T=558^{\circ}\text{C}$ .

Визуализация выполненных расчетов частично приведена на рисунке 5.

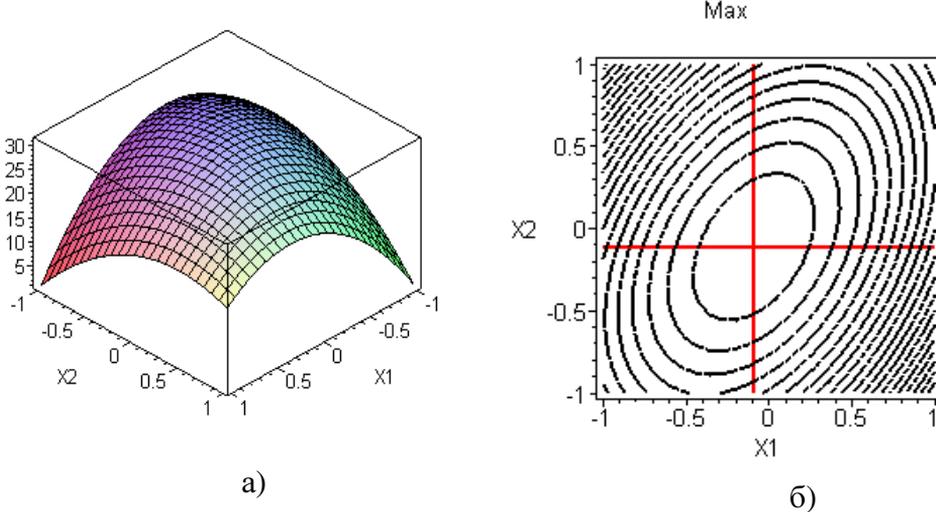


Рис. 5.-Зависимость максимальных напряжений в алмазном зерне от КТР металлофазы (X1) и модуля упругости связки (X2)  
а)-поверхность отклика; б)-двумерное сечение поверхности отклика

**Выводы.** В целом исследования, выполненные на базе разработанной методологии трехмерного моделирования процесса изготовления алмазно-абразивного инструмента, позволили сделать следующие выводы:

1. Установлено, что в процессе спекания алмазосодержащего слоя на керамических связках главной причиной преждевременного разрушения алмазных зерен являются внутренние напряжения в зерне, обусловленные резко отличными значениями КТР металлофазы и алмаза. Установлена преобладающая роль температурного фактора, определяющего целостность алмазной композиции на этапе спекания алмазосодержащего слоя.

2. Установлена определяющая роль физико-механических свойств металла-катализатора и его процентного содержания в обеспечении сохранности исходного состояния алмазных зерен и их взаимосвязь с технологическими параметрами процесса спекания алмазосодержащего слоя. Выявлено, что при увеличении модуля упругости металлофазы от 180 до 250 ГПа значения приведенных напряжений в системе «связка–зерно–металлофаза» увеличиваются примерно на 36%. Снижение процентного содержания металлофазы в зерне на 5% повышает его термостойкость примерно на 20%.

Анализ полученных зависимостей напряжений, возникающих в системе «зерно–металлофаза–связка–ОМ» от модуля упругости связки позволил установить, что максимальный уровень напряжений имеет место при  $\mu_{св.}=505$  ГПа.

4. На основе модельных экспериментов и с дальнейшим использованием математического метода планирования многофакторного эксперимента получены математические модели, описывающие процессы спекания алмазных кругов и установлены оптимальные значения факторов в наибольшей степени определяющих уровень НДС системы «зерно–металлофаза–связка–ОМ».

### **Литература**

1. Oliveira J.F.G, Silva E.J. and other. Industrial challenges in grinding // Annals of the CIRP. – v. 58. – p.663–680.
2. Jackson M.J., Barlow N., and other. Computer Aided Design of High-Performance Grinding Tools //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (London), Part B //Journal of Engineering Manufacture. – 2001. – v. 215. – p. 583-588.
3. Gol'din V.V. , Zhuravsky V. G. and other. CALS technologies and tolerant translators Automation and Remote Control. – v. 68. – № 4. – p. 710-726.
4. Karpuschewski B., Wehmeier M. and other. Grinding Monitoring System Based on Power and Acoustic Emission Sensors // Annals of the CIRP. – 2000. – v.49. – № 1. –p.235-240.

*Надійшла до редакції 07.04.2014*