УДК 621.923

В.А. ФЕДОРОВИЧ, д-р техн. наук,
И.Н. ПЫЖОВ, д-р техн. наук, Харьков, Украина

3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Наведені результати досліджень по 3D моделюванню напружено-деформованого стану алмазоносного шару при спіканні алмазних шліфувальних кругів. Встановлено вплив основних факторів на виникаючі внутрішні напруження в зернах. За допомогою багатофакторного експерименту отримана математична модель, яка відображає вплив цих факторів на напружено-деформований стан системи «алмазне зерно – металофаза – зв'язка».

Приведены результаты исследований по 3D моделированию напряженно-деформированного состояния алмазоносного слоя при спекании алмазных шлифовальных кругов. Установлено влияние основных факторов на возникающие внутренние напряжения в зернах. С помощью многофакторного эксперимента получена математическая модель, которая отражает влияние этих факторов на напряженно-деформированное состояние системы «алмазное зерно - металлофаза - связка».

The results of investigations on 3D simulation of the diamond-bearing layer deflected mode when sintering diamond grinding wheels are given. The influence of the main factors in the internal stresses arising in the grains are revealed. Using multifactorial experiment the mathematical model, which reflects the impact of these factors on the deflected mode of the «diamond grain - metal phase - bond» system is obtained.

Постановка проблемы. Эффективность эксплуатации алмазных кругов во многом определяется такими факторами как качество изготовления алмазоносного слоя и его оптимальная характеристика. Процесс изготовления алмазных кругов на различных связках характеризуется достаточно высокой трудоемкостью. Необходимо достичь повышения надежности и качества при изготовлении алмазно-абразивного инструмента, без чего невозможно его эффективное применение в производстве. Это в первую очередь относится к процессу спекания алмазоносного слоя. В настоящее время отсутствуют научно обоснованные

© В.А. Федорович, И.Н. Пыжов, 2015

рекомендации по выбору рациональных сочетаний прочности, марки зерна, зернистости, концентрации с физико - механическими свойствами связок кругов. Следование существующим в литературе рекомендациям по применению в шлифовальных кругах на различных связках тех или иных сочетаний марок связок и алмазных зерен, их концентрации носят общий характер, что приводит к повреждению зерен в процессе спекания и в дальнейшем низкой производительности процесса абразивной обработки [1-2].

Одним из путей решения проблемы повышения эффективности изготовления алмазно-абразивного инструмента является использование методологии 3D моделирования этого процесса [3-9]. Методология основана на расчетах методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны спекания алмазно-абразивных инструментов и зоны шлифования. При этом без длительных, трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований расчетным путем можно определить рациональный состав алмазоносного слоя круга (физико-механические свойства связка круга, зернистость, концентрация алмазных зерен и др.), а при необходимости и рациональную конструкцию круга, например, для сверхскоростного шлифования и др.

Решение поставленных задач базируется на использовании пакетов программ COSMOS, ANSYS, NOSTRAN, «Third Wave AdvantEdge», «LS-DYNA», предназначенных для исследовательских расчетов методом конечных элементов.

В развитие выполненных ранее нами исследований [10-17] в данной работе было исследовано влияние количественного состава металлофазы в алмазном зерне и температуры на НДС алмазоносного слоя при спекании алмазных кругов.

Анализ последних исследований и публикаций. Установлено, что вопрос повышения эффективности алмазного шлифования остается актуальным и современные методы математического моделирования могут привнести значительные результаты. Известно, что в процессе эксплуатации алмазно-абразивного инструмента коэффициент эффективного использования алмазных зерен не превышает 5-10%. Остальные зерна разрушаются ещё на этапе изготовления либо выпадают в

ходе эксплуатации круга. Поэтому на начальном этапе изготовления алмазного круга на различных связках важно определить оптимальные технологические параметры его изготовления, а именно давление, температуру и время спекания при которых не будет нарушена целостность алмазных зерен. На следующем этапе эксплуатации спеченных кругов, необходимо рассмотреть и изучить факторы, повышающие эффективность процесса алмазного шлифования, что в дальнейшем позволит достичь высокого коэффициента использования потенциала алмазных зерен.

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

Основные материалы исследования. Для изучения процесса спекания алмазоносного слоя шлифовальных кругов при помощи 3D-моделирования рассматривалась система «связка –зерно - металлофаза» и учитывалось влияние компонентов этой системы на ее НДС в процессе спекания. Было изучено влияние свойств металлофазы (металла-катализатора) и её процентного содержания на изменение внутренних эквивалентных напряжений в алмазных зернах различных марок, после чего полученные результаты сравнивались.

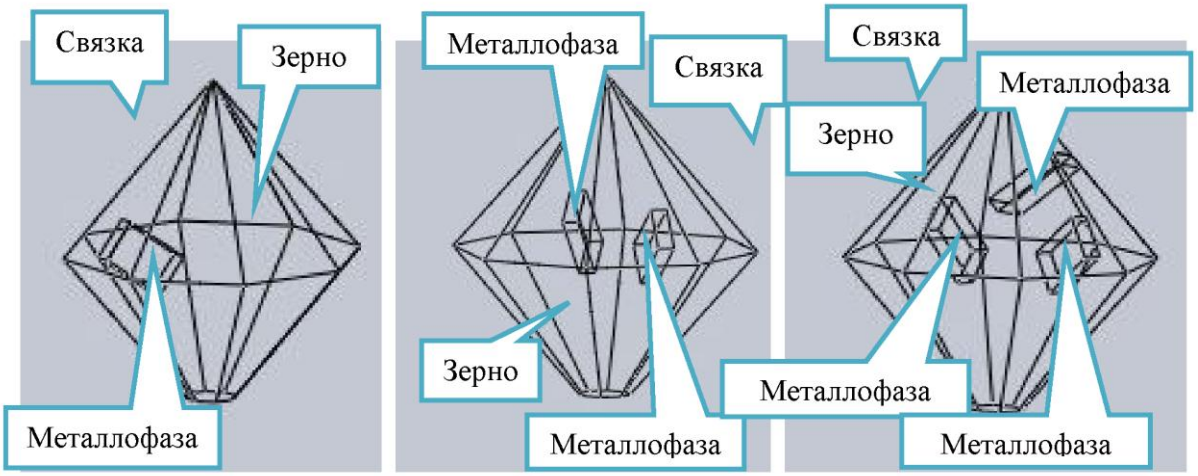
Влияние количественного состава металлофазы в зерне на НДС зоны спекания. В модели зерно и связка рассматривались упругими сплошными телами. Алмазные зерна моделировались в виде октаэдров (рис. 1) с размерами в зависимости от рассматриваемой зернистости от 50х30х30 до 500х300х300 мкм. Наличие металла-катализатора в алмазных зернах моделировалось произвольно ориентированными пластинами, объемное содержание которых составляло 5-10% [18]. Рассматривалось наличие одной, двух и трех включений металлофазы, расположенных у граней октаэдра. Связка круга представлялась в виде кубического фрагмента с размерами от 500х500х500 до 3000х3000х3000 мкм 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 НДС в ней проводились в приложении CosmosWorks.

Поскольку предел прочности алмаза на растяжение ниже чем на сжатие, то в качестве критерия разрушения принимались полученные расчетным путем значения максимальных растягивающих напряжений, которые сравнивались с пределом прочности для алмазов различных марок и зернистостей [5-6].

Алмазные зерна моделировались в виде восьмиугольников, а в зависимости от зернистости их размеры варьировались. В исходной модели рассматривалось алмазное зерно марки АС6 (зернистостью 160/125).

Для исследования влияния количественного состава металлофазы в зерне были разработаны модели с различным процентным содержанием металлофазы. На рисунке 1 показана расчетная модель, содержащая одно, два и три включения металла-катализатора.

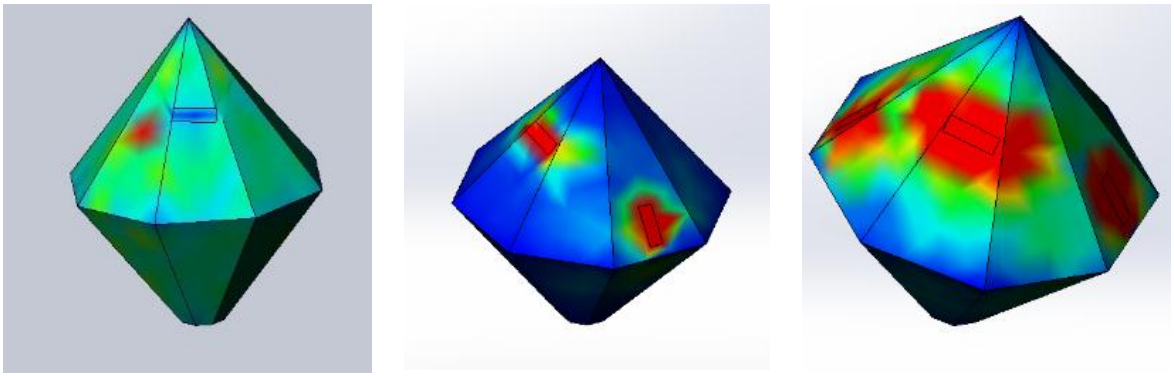


а) б) в)

Рисунок 1 – 3D модель алмазного зерна,
содержащего одно (а), два (б) и три (в) включения металла-катализатора

После построения расчетной 3D - модели была сгенерирована сетка конечных элементов, причем сетка сгущалась в месте присутствия алмазного зерна и металла-катализатора. Из эпюр напряжений,

представленных на рисунке 2, видно, что наибольшие напряжения при нагреве сконцентрированы в области металлофазы и именно она играет ключевую роль в разрушении алмазных зерен в процессе спекания алмазно - абразивного инструмента. При расположении включений металлофазы вблизи друг от друга наблюдается рост полей напряжений. При расположении всех трех включений металлофазы в верхней части зерна наблюдается наложение напряжений, что может привести к разрушению значительного объема алмазного зерна.



а) б) в)

Рисунок 2 – Напряжения в алмазном зерне,
содержащем одно (а), два (б) и три (в) включения металлофазы

Напряжения, превышающие предел прочности алмаза и расположенные на границах включений металлофазы, вызывают развитие внутренних трещин в зерне, что подтверждает результаты, полученные в работах [1, 2]. Объяснением этому служат возросшие значения напряжений в связке, оказывающие усиливающее воздействие на напряжения в зерне.

Наличие большого количества металлических включений в кристаллах приводит к снижению их прочности и особенно термостойкости. Известно, что нагрев синтетических алмазов, начиная с температуры 850 °С, может привести к снижению их прочности [19-20]. Причиной роста напряжений в системе с увеличением температуры является структурная неоднородность алмазных зерен и значительная разница в коэффициентах термического расширения (КТР) алмазной и

металлической фаз, что вызывает опережающее расширение включений и появление внутренних напряжений в зерне.

Для исследования процесса спекания был использован метод математического планирования многофакторного эксперимента. Был реализован D - оптимальный план типа В4. В качестве факторов принимались: количество металлофазы, КТР металлофазы, модуль упругости связки и температура. Значения уровней факторов, указаны в таблице.

Таблица – Уровни факторов плана В 4

Уровни факторов	Факторы							
	Количество металлофазы		КТР металлофазы		Модуль упругости связки,		Температура,	
	Натуральное значение, %	Кодированное значение X_1	Натуральное значение, 1/К	Кодированное значение, Х2	Натуральное значение, Н/м^2	Кодированное значение Х3	Натуральное значение, °С	Кодированное значение Х4
Верхний уровень	3	+1	3,16e-05	+1	2,04e+011	+1	800	+1
Основной уровень	2	0	2,24e-05	0	1,53e+011	0	600	0
Нижний уровень	1	-1	1,32e05	-1	1,02e+011	-1	400	-1

На рис. 3 приведена визуализация результатов расчета по проведенным 24-м модельным экспериментам. Она дает возможность в полной мере отобразить напряжения, возникающие в зоне спекания при варьировании четырех приведенных факторов одновременно. Для наглядности отображения напряжений, возникающих в окрестности металлофазы, связка была скрыта.

Обработка результатов планируемого эксперимента позволила получить уточненную математическую модель, описывающую процесс спекания алмазных шлифовальных кругов в представленном диапазоне варьирования независимых факторов:

$$Y = 3{,}71 + 0{,}58X_1 + 0{,}18X_2 + 0{,}03X_3 + 0{,}31X_4 - 0{,}03X_1X_2 + 0{,}007X_1X_3 + 0{,}39X_1X_4 + \\ + 0{,}006X_2X_3 - 0{,}03X_2X_4 + 0{,}02X_3X_4 + 0{,}32X_1^2 + 0{,}28X_2^2 + 0{,}13X_3^2 + 0{,}12X_4^2 \quad (1)$$

Влияние характеристик шлифовального круга на целостность алмазных зерен в процессе спекания. На рисунке 4 представлены зависимости напряжений, возникающие в системе «зерно–связка–

металлофаза» от количества включений металлофазы при изменении модуля упругости связки.

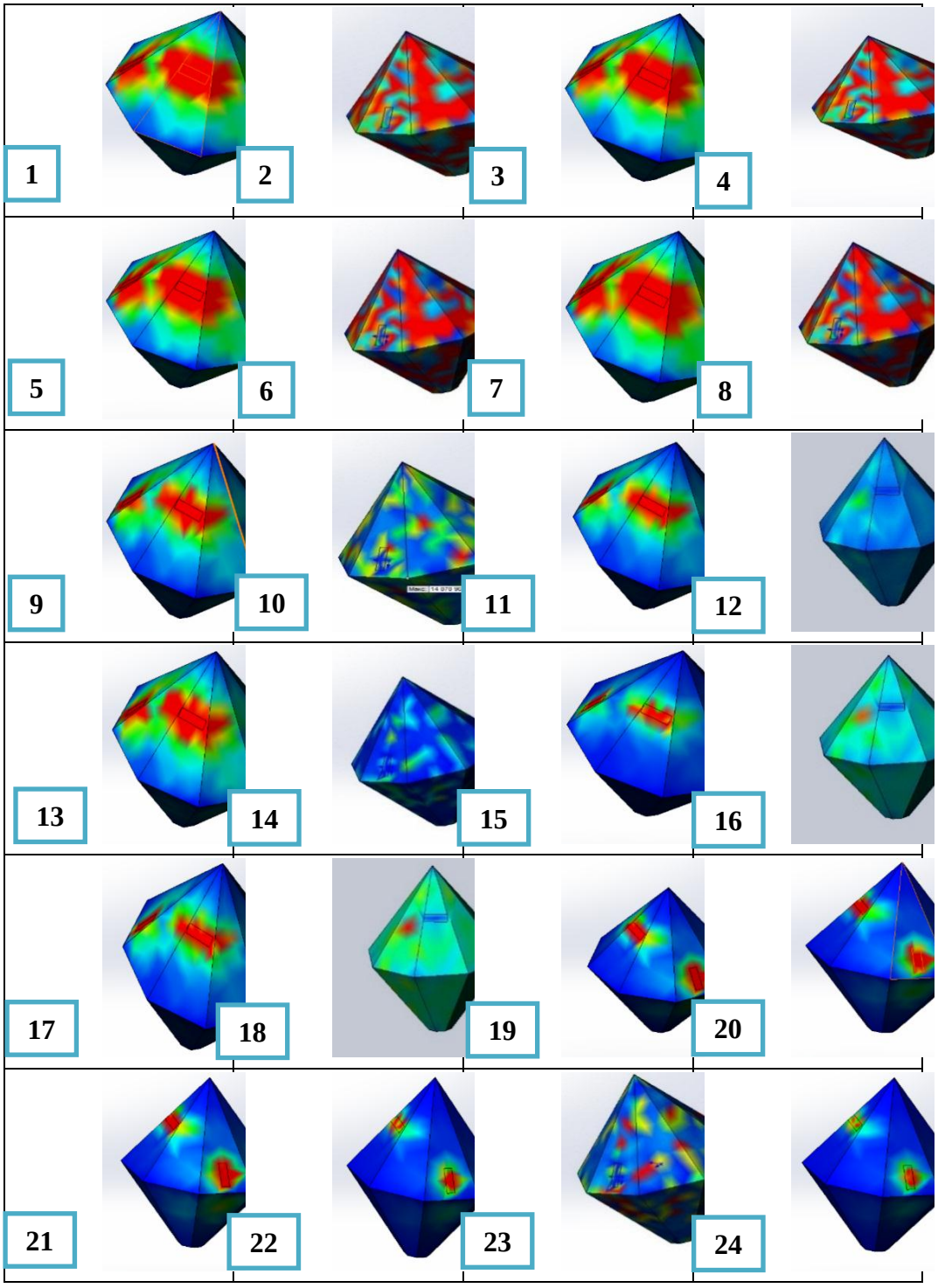


Рисунок 3 – Визуализация результатов моделирования
по влиянию факторов на НДС зоны спекания алмазоносного слоя

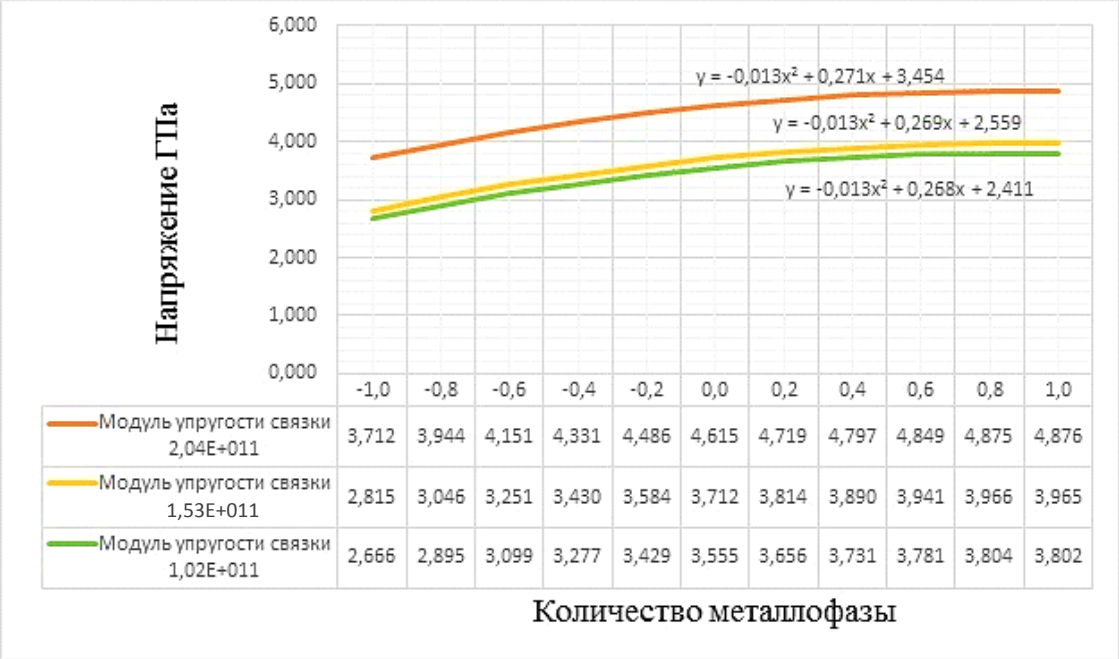
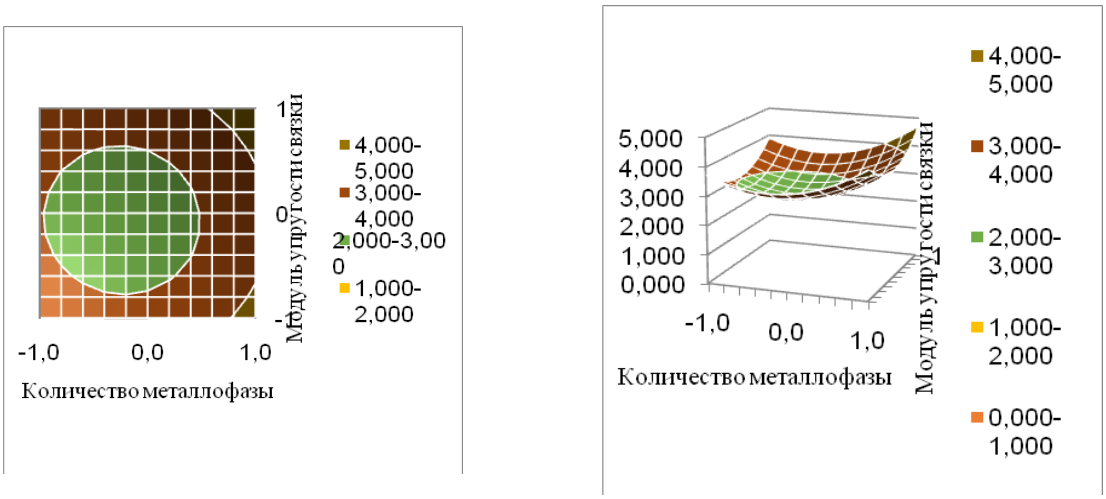


Рисунок 4 – Зависимость напряжений в системе
от количества металлофазы
при изменении модуля упругости связки

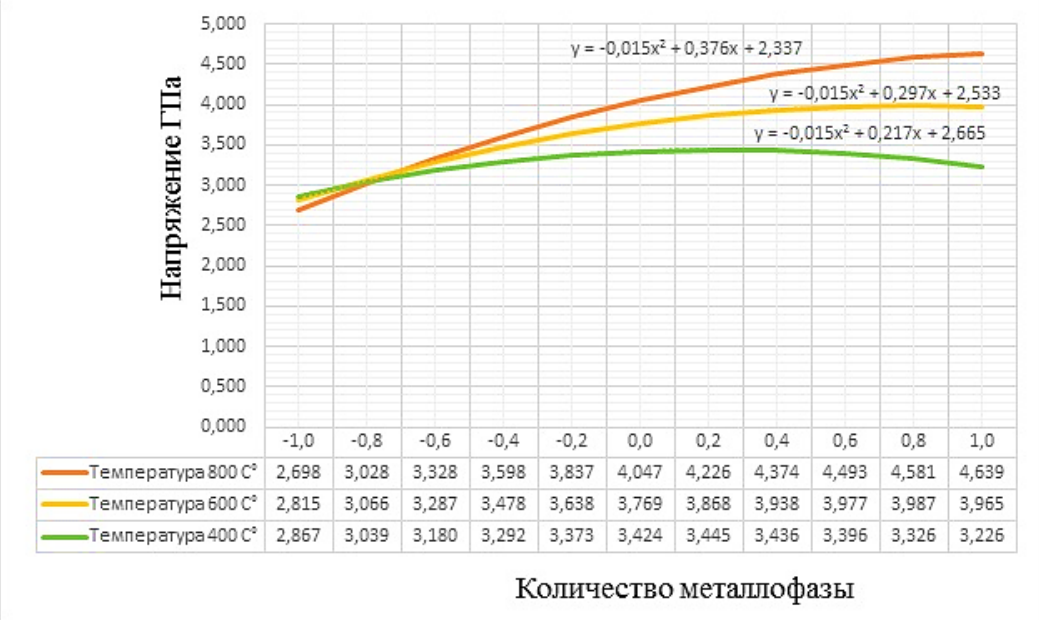
На рис. 5 приведены фрагменты построенных двух - и трехмерных зависимостей:



а) б)

Рисунок 5 – Двухмерные (а) и трехмерные (б) зависимости,
отражающие влияние количества металлофазы и модуля упругости связки
на НДС системы

На рис. 6 представлены зависимости напряжений, возникающих в системе «зерно–связка–металлофаза» от количества металлофазы при изменении температуры спекания.



	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Температура 800 С°	2,698	3,028	3,328	3,598	3,837	4,047	4,226	4,374	4,493	4,581	4,639
Температура 600 С°	2,815	3,066	3,287	3,478	3,638	3,769	3,868	3,938	3,977	3,987	3,965
Температура 400 С°	2,867	3,039	3,180	3,292	3,373	3,424	3,445	3,436	3,396	3,326	3,226

Рисунок 6 – Зависимость напряжений в системе
от количества металлофазы
при изменении температуры спекания

Выводы и перспективы развития. Проведенные теоретические исследования показали, что температура спекания алмазоносного слоя, оказывает наибольшее влияние на НДС системы «алмазное зерно – металлофаза - связка», независимо от вида связки. Увеличение напряжений в зёрнах наблюдается 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°С, приводит к снижению их прочности.

Причиной растрескивания алмазного зерна является различное значение коэффициентов термического расширения металлофазы (остатков металла-катализатора) и самого зерна. Как правило, коэффициент термического расширения металла-катализатора гораздо больше, чем у алмаза. Поэтому при нагревании происходит, так называемый разрыв алмазного зерна изнутри.

Установлено, что наименьшие напряжения наблюдаются при использовании металлической связки (модуль упругости 2.04E+11 Н/м^2), с одной металлофазой на основе никеля (КТР 1.32E-05 1/К).

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 процесса алмазного шлифования.

Список использованных источников: 1. *Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г.* Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов.-Х.,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.** *Heisel U, Krivoruchko DV, Zaloha VA, Storchak M* (2007) CauseAnalysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. Calabria 141–148. **4.** *Rizzutti S, Umbrello D, M'Saoubi R, Outeiro JC* (2007) Modelling and Validation of Tool Wear During Hard Machining of AISI H13 Tool Steel. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 293–300 **5.** *Ivester RW, Whitenton E, Heigel J* (2007) Measuring Chip Segmentation by High-Speed Microvideography and Comparison to Finite-Element Modelling Simulations. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 37–44 **6.** *Fischer C* (2007) Runtime and Accuracy Issues in Three Dimensional Finite Element Simulation of Machining Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 45–50. **7.** *Marusich TD, Usui S, Stephenson DA* (2007) Finite Element Modelling of Drilling Processes with Solid and Indexable Tooling in Metals and Stack-ups. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 51–58. **8.** *Denkena B, de Leon Garcia L, Köhler J* (2007) FEM-Simulation of High-Performance-Milling. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 149–156. **9.** *Dix M, Leopold J, Neugebauer R* (2007) Investigations on the Influence of Local Material Properties of Burr Formation. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 133–140. **10.** *P. Krajnik, J. Kopac* A review of High-Speed Grinding and High-Performance Abrasive Tools, Journal of Mechanical Engineering, Vol. 50/4, 2004. **11.** *J. Kovac, et al.*, A Feasibility Investigation of High-speed Low Damage Grinding of Advanced Ceramics, Proc. of the 1th Int. Grinding Conference, SME, 1993. **12.** *K. Syoji, N. Yamazaki, R. Watanabe and T. Kuriyagawa*, Influence of Wheel Surface Speed on Grindability of Grinding Material - Studies on Ultra-High Speed Grinding（3rd Report, J of JSPE (Japan Society of Precision Engineering), 2000.–p.1145-1149. **13.** *S. Ebrell, W.B. Rowe, M.N. Morgan* Process Characterisation of Grinding AISI 52100 with Vitrified CBN. Key Engineering Materials Vols.:Trans Tech Publications Switzerland, 2003. – p. 333-340. **14.** *S.C. Salmon* Modern Grinding Process Technology, McGraw-Hill, Inc., 1992.

15. *W. Renaud, M. Hitchiner* The Development of Camshaft Lobe Grinding with Vitrified cBN. 1st Int. Machining and Grinding Conf..– Michigan: SME,1995. **16.** *Мишнаевский Л.Л.* Оптимизация свойств инструментов из СТМ при шлифовании конструкционных металлов/ Сверхтвердые материалы, - 1985. № 3. - 45-49 с. **17.** *E. Galen* Superabrasive Grinding, Why Bond Selection Matters, Manufacturing Engineering Magazine, SME, 2001, **18.** *Мишнаевский Л.Л., Корж Н.Я.* Профильное шлифование кругами из сверхтвердых материалов/ Сверхтвердые материалы, 1979. – 54-57 с. **19.** Сверхтвердые материалы. Получение и применение: Монография в 6 томах. Под общей ред. *Н. В. Новикова* — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2003—2007 гг. **20.** Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-и т. / Под общей ред. *Н.В. Новикова*. – Т.6: Алмазно-абразивные инструменты в технологиях механообработки / Под ред. *А.А. Шепелева*. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 340 с.

Bibliography (transliterated): 1. Semko M.F., Grabchenko A.I., Hodorevskij M.G. Almaznoe shlifovanie sinteticheskih sverhtverdyh materialov.-H.,1980.-192 s. 2. Fedorovich V.O. Rozrobka naukovih osnov ta sposobiv praktichnoї realizaciї upravlinnja pristosovuvanistju pri almaznomu shlifuvanni nadtverdih materialiv. Avtoref. dis.... dokt. tehn. nauk 05.03.01 – Harkiv, 2002, 34s. 3. Heisel U, Krivoruchko DV, Zaloha VA, Storchak M (2007) CauseAnalysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. Calabria 141–148. 4. Rizzutti S, Umbrello D, M'Saoubi R, Outeiro JC (2007) Modelling and Validation of Tool Wear During Hard Machining of AISI H13 Tool Steel. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 293–300 5. Ivester RW, Whitenton E, Heigel J (2007) Measuring Chip Segmentation by High-Speed Microvideography and Comparison to Finite-Element Modelling Simulations. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 37–44 6. Fischer C (2007) Runtime and Accuracy Issues in Three Dimensional Finite Element Simulation of Machining Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 45–50. 7. Marusich TD, Usui S, Stephenson DA (2007) Finite Element Modelling of Drilling Processes with Solid and Indexable Tooling in Metals and Stack-ups. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 51–58. 8. Denkena B, de Leon Garcia L, Köhler J (2007) FEM-Simulation of High-Performance-Milling. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 149–156. 9. Dix M, Leopold J, Neugebauer R (2007) Investigations on the Influence of Local Material Properties of Burr Formation. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 133–140. 10. P. Krajnik, J. Kopac A review of High-Speed Grinding and High-Performance Abrasive Tools, Journal of Mechanical Engineering, Vol. 50/4, 2004. 11. J. Kovac, et al., A Feasibility Investigation of High-speed Low Damage Grinding of Advanced Ceramics, Proc. of the 1th Int. Grinding Conference, SME, 1993. 12. K. Syoji, N. Yamazaki, R. Watanabe and T. Kuriyagawa, Influence of Wheel Surface Speed on Grindability of Grinding Material - Studies on Ultra-High Speed Grinding (3rd Report, J of JSPE (Japan Society of Precision Engineering), 2000.–p.1145-1149. 13. S. Ebrell, W.B. Rowe, M.N. Morgan Process Characterisation of Grinding AISI 52100 with Vitrified CBN. Key Engineering Materials

Vols.:Trans Tech Publications Switzerland, 2003. – p. 333-340. 14. S.C. Salmon Modern Grinding Process Technology, McGraw-Hill, Inc., 1992. 15. W. Renaud, M. Hitchiner The Development of Camshaft Lobe Grinding with Vitrified cBN. 1st Int. Machining and Grinding Conf..– Michigan: SME,1995. 16. Mishnaevskij L.L. Optimizacija svojstv instrumentov iz STM pri shlifovanii konstrukcionnyh metallov/ Sverhtverdye materialy, - 1985. № 3. - 45-49 s. 17. E. Galen Superabrasive Grinding, Why Bond Selection Matters, Manufacturing Engineering Magazine, SME, 2001, 18. Mishnaevskij L.L., Korzh N.Ja. Profil'noe shlifovanie krugami iz sverhtverdyh materialov/ Sverhtverdye materialy, 1979. – 54-57 s. 19. Sverhtverdye materialy. Poluchenie i primenenie: Monografija v 6 tomah. Pod obshhej red. N. V. Novikova — Kiev: ISM im. V. N. Bakulja, IPC «ALKON» NANU, 2003—2007 gg. 20. Sverhtverdye materialy. Poluchenie i primenenie: V 6-i t. / Pod obshhej red. N.V. Novikova. – T.6: Almazno-abrazivnye instrumenty v tehnologijah mehanoobrabotki / Pod red. A.A. Shepeleva. – K.: ISM im. V.N. Bakulja, IPC «ALKON» NANU, 2006. – 340 s.