

УДК 621.923

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

МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛМАЗНЫХ КРУГОВ НА ЭТАПЕ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Розроблено єдину комплексну методологію тривимірного (3D) моделювання фізичних процесів виготовлення алмазно-абразивного інструмента. Створення системи 3D-CAD моделювання процесів спікання алмазно-композиційних матеріалів дозволяє істотно підвищити вірогідність отриманих результатів, скоротити обсяг експериментальних досліджень для визначення оптимальних умов не тільки виготовлення шліфувальних і правильних інструментів з них, але й обробки, розробити нові технології, інструменти й устаткування

Ключові слова: алмазносний шар, шліфувальний круг, включення металофази, зв'язка, алмазні зерна

Разработана единая комплексная методология трехмерного (3D) моделирования физических процессов изготовления алмазно-абразивного инструмента. Создание системы 3D-CAD моделирования процессов спекания алмазно-композиционных материалов позволяет существенно повысить вероятность полученных результатов, сократит объем экспериментальных исследований для определения оптимальных условий не только изготовления шлифовальных и правильных инструментов из них, но и обработки, разработать новые технологии, инструменты и оборудование

Ключевые слова: алмазносный слой, шлифовальный круг, включения металлофазы, связка, алмазные зерна

The uniform complex methodology of three-dimensional (3D) modeling of physical processes of making of diamond-abrasive tool is designed. The creation of the 3D-CAD system of modeling of processes of sintering of diamond-composition materials can significantly improve probability of received results, reduce the volume of experimental researches for determination of optimal conditions of not only manufacture of grinding and dressing tools from them, but also of machining, can develop new technologies, tools and equipment.

Keywords: diamond-comprising layer, grinding wheel, inclusions of metal phase, bundle, diamond grains

Создание методологических основ и системы 3D-CAD моделирования алмазно-композиционных материалов (АКМ) на этапах их изготовления и эксплуатации позволит существенно повысить эффективность обработки и применения инструмента из них. Предлагаемая 3D методология исследования процессов изготовления и эксплуатации алмазосного слоя шлифовального круга охватывает все основные этапы жизненного цикла инструмента. Так как реализация предложенной последовательности экспериментальным путем является чрезвычайно трудоемким и дорогостоящим процессом,

предлагается вариант реализации этих этапов методом компьютерного 3D моделирования.

Использование компьютерных информационных технологий на всех этапах жизненного цикла изделия, в данном случае шлифовального инструмента из АКМ, рассматривается как приближение к идеологии CALS-технологии (Computer-Aided Logistics Support) [1]. Они обеспечивают компьютерное управление жизненным циклом изделия на всех этапах: разработки концепции изделия, проведения научно-исследовательских работ, проектирования, производства, эксплуатации, модернизации, обеспечения ремонта и технического обслуживания изделия, его утилизации.

Решение поставленных задач базируется на использовании пакетов программ COSMOS, ANSYS, NOSTRAN, предназначенных для исследовательских расчетов методом конечных элементов. В плане моделирования процессов спекания алмазосодержащего слоя и исследования зоны обработки шлифовальным кругом из АКМ эти пакеты (в универсальной комплектации) позволяют решать многие классы задач.

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) алмазосодержащего слоя шлифовального круга осуществлялся путем его 3D моделирования. Проводилась серия расчетов для фрагмента алмазосодержащего слоя, включающего единичное алмазное зерно, окруженное массивом связки. Рассматривалась модель с зерном в форме октаэдра (рис. 1). В зависимости от рассматриваемой зернистости, значения которой варьировались от 50/40 до 500/400 мкм, размеры зерен изменялись 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 от 5 % до 10% [2]. Рассматривалось наличие одного, двух и трех 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 также температура спекания и 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.

Для исследования влияния количественного состава металлофазы разработаны модели с различным ее содержанием и произвольной ориентацией в зерне. На рис. 1 показана расчетная модель, содержащая одно (5% металлофазы), два (7% металлофазы) и три (10% металлофазы) включения металла-катализатора (рисунок 1 а, б и в соответственно).

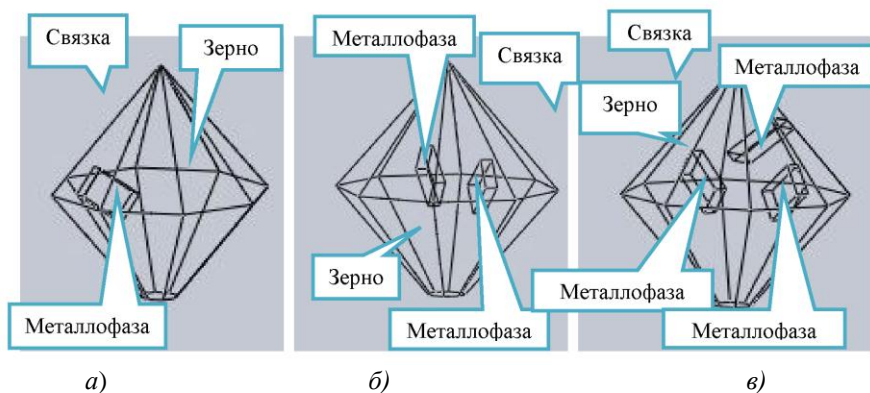


Рисунок 1 – 3D модель фрагмента алмазного слоя, включающая зерно с одним (а), двумя (б) и тремя (в) включениями металла-катализатора и связку

Геометрические модели «связка–алмазные зерна–металлофаза» построены с использованием коммерческого программного САД обеспечения SolidWorks. Основным допущением при моделировании процесса спекания было выделение фрагмента алмазного слоя в виде куба с некоторым количеством алмазных зерен, ограниченного массивом связки со всех сторон [3, 4], что в полной мере можно аппроксимировать на алмазный круг в целом.

Расчеты по методу конечных элементов позволили количественно оценить главные и приведенные напряжения, энергию деформации и плотность энергии деформации в спекаемых элементах в зависимости от их размеров, физико-механических свойств и температуры спекания. Объемы материалов считались разрушенными, если приведенные напряжения и/или плотность энергии деформации в них превышали соответствующие предельные значения.

В расчетную модель закладывались следующие характеристики материалов: модуль упругости, коэффициент Пуассона, массовая плотность материала, коэффициент линейного термического расширения (КТР), теплопроводность материала и его удельная теплоемкость (рис. 2). В качестве решателя (CAE программы) в данном случае использовались CosmosSimulation.

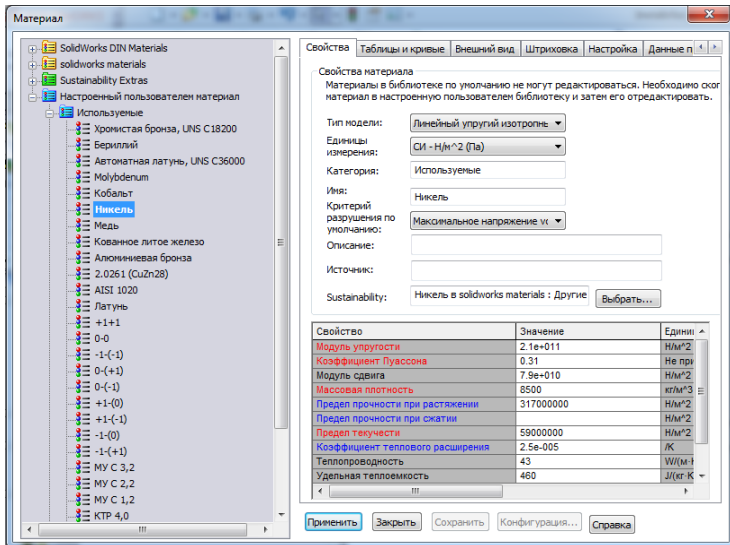


Рисунок 2 – Задаваемые значения физических свойств материала в *CosmosWorks*

Модельные эксперименты проводились в соответствии с теорией планирования эксперимента. Значения факторов кодировались путем линейного преобразования координат факторного пространства с переносом начала координат в нулевую точку и выбором масштабов по осям в единицах интервалов варьирования факторов. Общий вид математической модели:

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{i,j} X_i X_j + \sum b_{ii} X_i^2 + \dots \quad (1)$$

где X – независимые переменные, факторы;

Y – зависимые переменные, отклики, параметры оптимизации, функции цели;

b_i – коэффициенты, определяемые расчетным путем.

При исследовании процесса спекания в качестве факторов принимались: количество металлофазы, свойства металла-катализатора (КТР металлофазы при 500 °С), свойства связки (модуль упругости при 500 °С), режимы спекания (температура, °С), описание которых представлено в табл. 1.

Таблица 1 – Уровни факторов

Уровни факторов	Факторы							
	Количество металлофазы		Свойства металла-катализатора (КТР при 500 ⁰ С), 1/К		Свойства связки (модуль упругости при 500 ⁰ С), Н/м ²		Режимы спекания (температура, ⁰ С)	
	Натуральное значение	Кодированное значение X1	Натуральное значение, 1/К	Кодированное значение X2	Натуральное значение, Н/м ²	Кодированное значение X3	Натуральное значение, ⁰ С	Кодированное значение X4
Верхний уровень	3	+1	1.7E-05	+1	1.9E+11	+1	800	+1
Основной уровень	2	0	1.4E-05	0	1.5E+11	0	500	0
Нижний уровень	1	-1	1.1E-05	-1	1.1E+11	-1	200	-1

Согласно матрицы планирования модельного эксперимента было проведено 24 модельных опыта, результаты которых использованы в уравнениях регрессии. Исследуемые факторы варьировались от -1 до +1. Так как все 4 исследуемых фактора играют важную роль при спекании алмазосносного слоя, то были подробно рассмотрены наиболее существенные зависимости факторов друг от друга, т.е. один фактор варьировался, а другой принимал постоянные значения.

Рис. 3 представляет визуализацию результатов моделирования по влиянию выбранных факторов на НДС зоны спекания алмазосносного слоя в соответствии с данными модельного эксперимента.

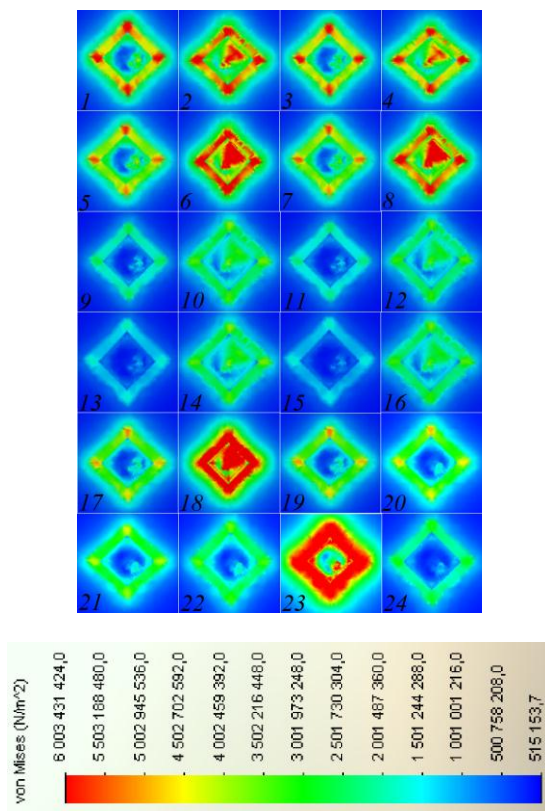


Рисунок 3 – Визуализация результатов моделирования по влиянию выбранных факторов на НДС зоны спекания алмазоносного слоя

Напряжения, превышающие пределы прочности алмаза, расположены на границах включений металлофазы и вызывают развитие внутренних трещин в зерне, что согласуется с результатами работ [5-7]. Установлено, что при повышении прочности связок наблюдается рост объемов зон, на которые распространяются напряжения. Объяснением этому служат возросшие значения напряжений в связке, усиливающие напряжения в зерне [8].

Проведенные модельные эксперименты позволили установить математические зависимости между основными характеристиками компонентов алмазоносного слоя. Обработка результатов планируемого эксперимента позволила получить уточненную математическую модель, адекватно описывающую процесс спекания шлифовальных кругов из АКМ в представленном диапазоне варьирования независимых факторов:

$$Y = 4,585 - 0,957X_1 + 0,072X_2 + 0,044X_3 + 2,331X_4 - 0,061X_1X_2 + 0,273X_1X_3 - 0,468X_1X_4 - 0,057X_2X_3 + 0,064X_2X_4 - 0,022X_3X_4 + 1,105X_1^2 - 1,400X_2^2 - 2,065X_3^2 + 1,080X_4^2 \quad (2)$$

На рис. 4, 6, 8 представлены зависимости напряжений, возникающих в системе «связка–алмазное зерно–металлофаза» от количества металлофазы при изменении модуля упругости связки и температуры спекания.

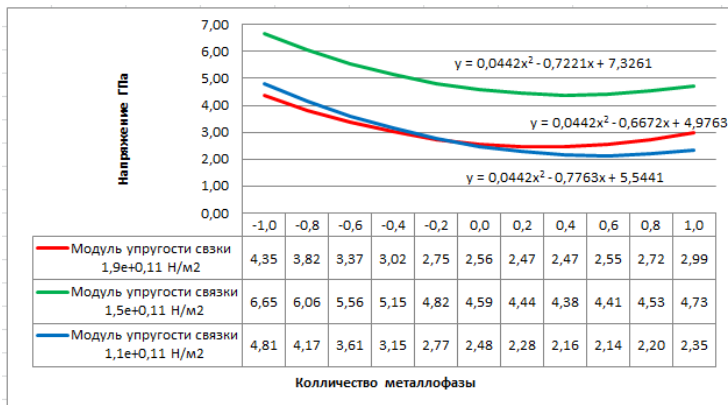


Рисунок 4 – Зависимость напряжений в системе от количества металлофазы при изменении модуля упругости связки

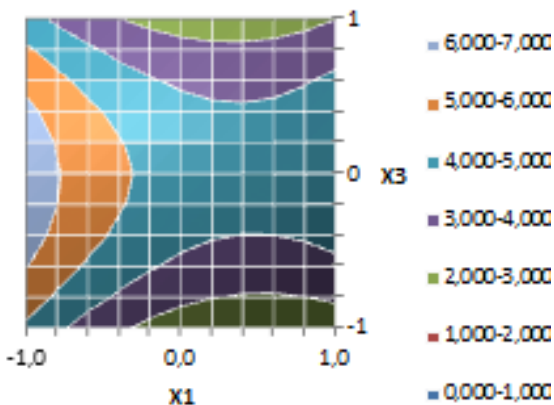


Рисунок 5 – Визуализация оптимальных значений напряжений при спекании алмазного круга в зависимости от количества металлофазы при изменении модуля упругости связки

На рис. 5, 7, 9 представлены визуализации оптимальных значений напряжений при спекании алмазноносного слоя круга в зависимости от различных факторов.

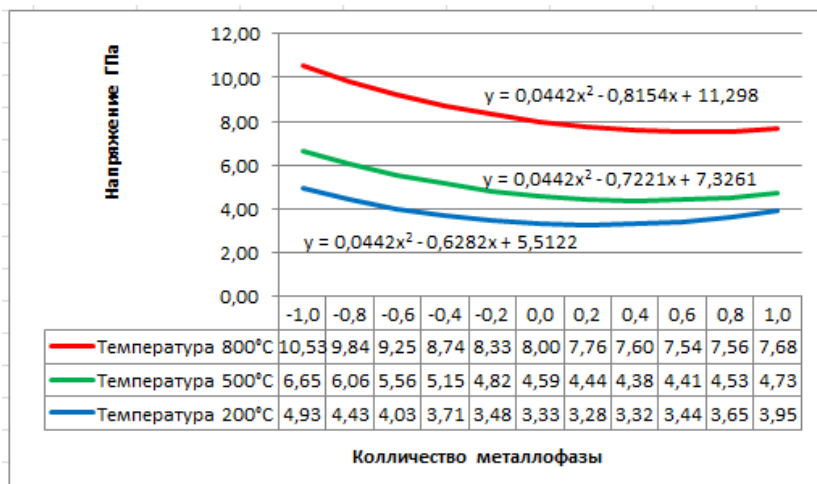


Рисунок 6 – Зависимость напряжений в системе от количества маталлофазы при изменении температуры спекания

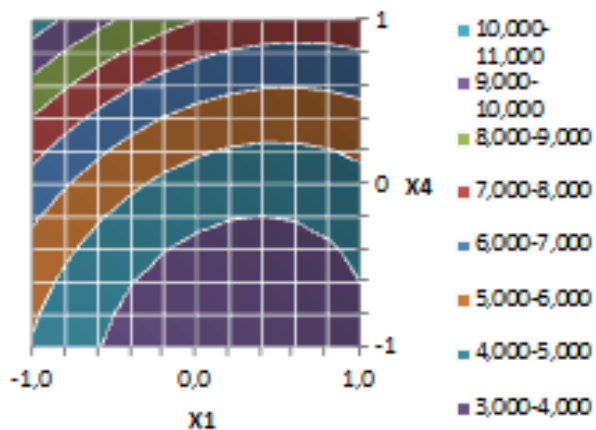


Рисунок 7 – Визуализация оптимальных значений напряжений при спекании алмазного круга в зависимости от количества маталлофазы при изменении температуры спекания

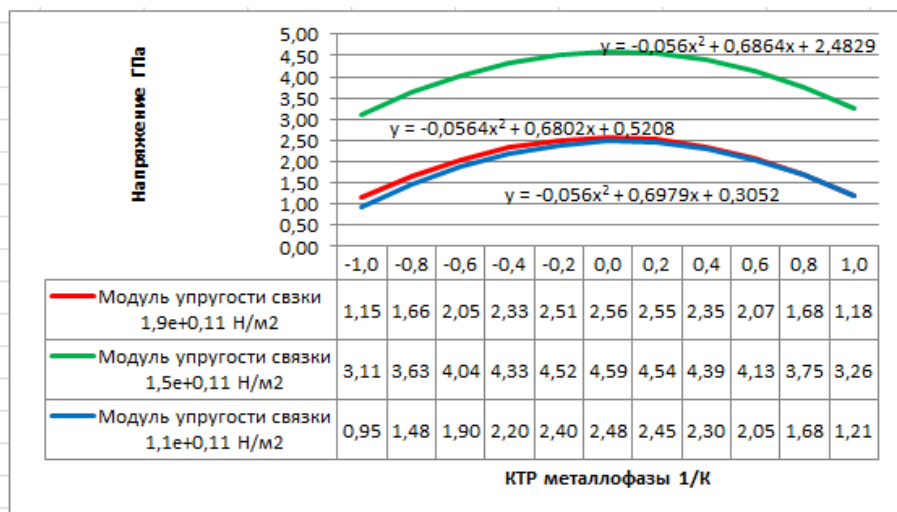


Рисунок 8 – Зависимость напряжений в системе от КТР металлофазы при изменении модуля упругости связки

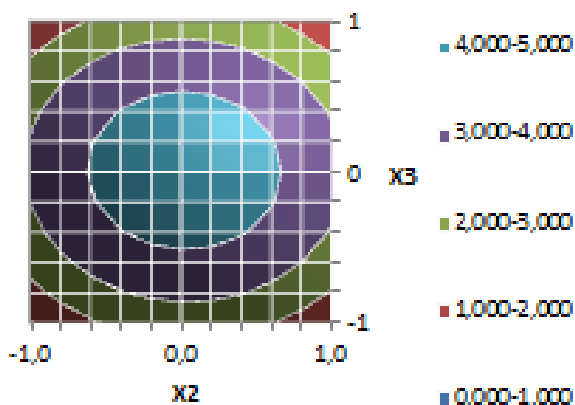


Рисунок 9 – Визуализация оптимальных значений напряжений при спекании алмазосодобного слоя круга в зависимости от КТР металлофазы при изменении модуля упругости связки

Анализ полученных зависимостей позволил установить, что максимальный уровень напряжений, возникающих в системе «связка–

алмазное зерно–металлофаза» наблюдается для значений модуля упругости связи, соответствующему нулевому уровню данного параметра. Анализ зависимости напряжений от количества металлофазы при изменении температуры спекания показал, что наибольшие напряжения возникают при верхнем уровне фактора.

Оптимизация процесса спекания алмазоносного слоя шлифовального круга проводилась в программном пакете Maple 14 по минимальным значениям напряжений в зерне, так как главное условие процесса – достижение неразрушения алмазных зерен во время изготовления АКМ. Как результат установлены оптимальные значения факторов $X_{1\text{опт}} = 0$; $X_{2\text{опт}} = -1$; $X_{3\text{опт}} = -1$; $X_{4\text{опт}} = -0,99$, при которых максимальное напряжение составляет $Y_{\text{min}} = -0,373$ ГПа.

В реальных значениях оптимальное количество металлофазы составляет 7%, КТР металлофазы – $1.1E-05$ 1/К, модуль упругости связи – $1.1E+11$ Н/м², температура спекания – 205 °С. При этих условиях спекания изготовление алмазоносного слоя шлифовального круга происходит без разрушения алмазных зерен. Если требуется изменение какого-либо из факторов, например, температуры спекания с 205 °С до 800 °С, из уравнения регрессии подбирается оптимальное значение количества металлофазы или ее КТР, или модуль упругости связи.

Известно, что нагрев синтетических алмазов, начиная с температуры 850 С может привести к снижению их прочности, причиной чего является различие в значениях коэффициентов термического расширения металлофазы и алмаза: КТР металла-катализатора гораздо больше, чем у синтетического алмаза, поэтому при нагревании происходит, так называемый разрыв алмазного зерна изнутри.

Рис. 10 показывает влияние количественного содержания металлофазы в зерне на изменение эквивалентных напряжений, возникающих в зоне спекания алмазоносного слоя.

На эпюрах напряжений видно, что наибольшие напряжения при нагревании сконцентрированы в области металлофазы, и именно она играет ключевую роль в разрушении алмазных зерен в процессе спекания алмазно-абразивного инструмента (рис. 11). Расчеты показали, что с увеличением процентного содержания металлофазы, напряжения в алмазном зерне возрастают и могут привести к его преждевременному разрушению.

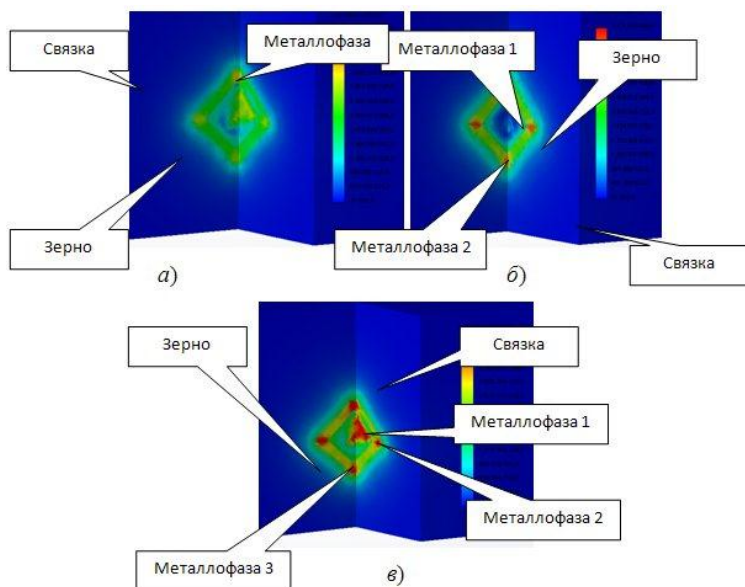


Рисунок 10 – Влияние количественного содержания металлофазы в зерне на изменение эквивалентных напряжений, возникающих в зоне спекания алмазного слоя при: а) 5 %; б) 7 %; в) 10% металлофазы

Визуализация оптимального значения напряжений приведена на рис. 11-13.

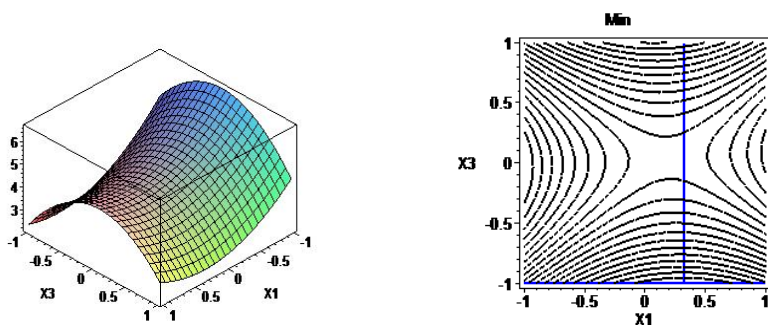


Рисунок 11 – Зависимость минимальных напряжений в алмазном зерне от количества металлофазы (X1) и модуля упругости связки (X3)

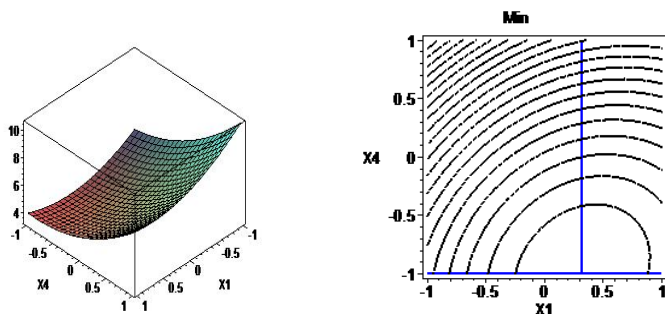


Рисунок 12 – Зависимость минимальных напряжений в алмазном зерне от количества металлофазы (X1) и температуры спекания (X4)

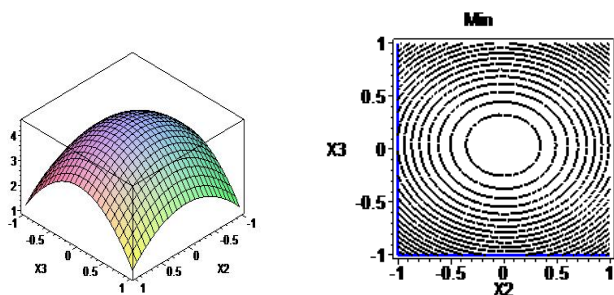


Рисунок 13 – Зависимость минимальных напряжений в алмазном зерне при спекании от КТР металлофазы (X2) и модуля упругости связки (X3)

Таким образом, проведенная на основе теории планирования расчетного эксперимента оптимизация результатов 3D моделирования процесса спекания алмазного слоя шлифовального круга позволила теоретическим путем определить оптимальные значения факторов, при которых напряжения в алмазных зернах при спекании круга будут минимальны.

Эпюры напряжений показывают, что наибольшие напряжения при нагревании сконцентрированы в областях включений металлофазы, что подтверждает именно ее ключевую роль в разрушении алмазных зерен в процессе спекания алмазно-абразивного инструмента.

Предложенная авторами методология моделирования процесса изготовления алмазно-абразивных инструментов на основе метода конечных элементов в совокупности с планированием модельных экспериментов позволяет без трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований определять оптимальную структуру и физико-механические свойства алмазосодержащего слоя круга и условия его изготовления.

Список использованных источников: 1. *Heisel U., Krivoruchko D.V., Zaloha V.A., 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. 2. The properties of diamond / Ed. By *J.E. Field.* – London, Academic Press, 1979. – 674 p. 3. *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. 4. *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. 5. *Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г.* Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. – Х., 1980 . – 192 с. 6. 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. 7. *Kundrak J.* Some features of the surface micro- and macroprofile formation at flat face grinding with spindle axis inclination / *J. Kundrak, V. Fedorovich, I. Pyzhov, A. Markopoulos, V. Klimenko* // Applied Mechanics and Materials [Peer-Reviewed Journal]. – Pfaffikon [Canton of Zurich, Switzerland] : Trans Tech Publications Ltd. – 2015. – Vols. 809-810. – P. 45-50. 8. *Grabchenko A.* Simulation of grinding process of polycrystalline superhard materials / *A. Grabchenko, V. Fedorovich, I. Pyzhov, V. Fadeev, E. Babenko, V. Klimenko* // Key Engineering Materials. – Zurich: Trans Tech Publications. – 2013. – Vol. 581. – P. 217-223.

Bibliography (transliterated): 1. *Heisel U., Krivoruchko D.V., Zaloha V.A., 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. 2. The properties of diamond / Ed. By *J.E. Field.* – London, Academic Press, 1979. – 674 p. 3. *Fedorovich V.O.* Rozrobka naukovih osnov ta sposobiv praktichnoi realizacii upravlinnja pristosovuvanistju pri almaznomu shlifuvanni nadtverdyh materialiv. Avtoref. dis.... dokt. teh. nauk 05.03.01 – Harkiv, 2002, 34 s. 4. *Kozakova N.V.* Opredelenie racional'nyh charakteristik almaznyh krugov putem 3D modelirovanija processov ih izgotovlenija i shlifovanija sverhtverdyh materialov.: Dis. ... kand. teh. nauk: 05.03.01. – Har'kov, 2005. – 210 s. 5. *Semko M.F., Grabchenko A.I., Hodorevskij M.G.* Almaznoe shlifovanie sinteticheskikh sverhtverdyh materialov. – H., 1980 . – 192 s. 6. Sverhtverdye materialy. Poluchenie i primenenie: V 6-i t. / Pod obshhej red. *N.V. Novikova.* – T.6: Almazno-abrazivnye instrumenty v tehnologijah mehanooobrabotki / Pod red. *A.A. Shepeleva.* – K.: ISM im. V.N. Bakulja, IPC «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 340 s. 7. *Kundrak J.* Some features of the surface micro- and macroprofile formation at flat face grinding with spindle axis inclination / *J. Kundrak, V. Fedorovich, I. Pyzhov, A. Markopoulos, V. Klimenko* // Applied Mechanics and Materials [Peer-Reviewed Journal]. – Pfaffikon [Canton of Zurich, Switzerland] : Trans Tech Publications Ltd. – 2015. – Vols. 809-810. – P. 45-50. 8. *Grabchenko A.* Simulation of grinding process of polycrystalline superhard materials / *A. Grabchenko, V. Fedorovich, I. Pyzhov, V. Fadeev, E. Babenko, V. Klimenko* // Key Engineering Materials. – Zurich: Trans Tech Publications. – 2013. – Vol. 581. – P. 217-223.