

В.А. Федорович, д-р техн. наук, Д.В. Ромашов, А.М. Малиняк,  
Д.О. Федоренко, Е.О. Бабенко, Харьков Украина

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

*У статті проведені дослідження процесів виготовлення та використання алмазного інструмента. Дослідженні елементи системи "оброблюваний матеріал - зерно - металофаза - зв'язка". Аналіз здійснювався шляхом 3D моделювання напружено-деформованого стану зони шліфування. За результатами дослідження встановлено, що алмазні шліфувальні круги на різних зв'язках мають початкову дефектність у вигляді зруйнованих в процесі спікання алмазних зерен. Розроблені 3D-моделі процесу спікання та шліфування алмазними кругами, що враховують анізотропію властивостей алмазних зерен та їх форму.*

*В статье проведены исследования процессов изготовления и использования алмазного инструмента. Исследованы элементы системы "обрабатываемый материал - зерно - металлофаза - связка". Анализ осуществлялся путем 3D моделирования напряженно-деформированного состояния зоны шлифования. По результатам исследования установлено, что алмазные шлифовальные круги на различных связках имеют исходную дефектность в виде разрушенных в процессе спекания алмазных зерен. Разработаны 3D-модели процесса спекания и шлифования алмазными кругами, учитывающие анизотропию свойств алмазных зерен и их форму.*

*In this paper described researches of process of manufacture and grinding by diamond tools. Researched elements of system "work material - grain - metalphase - sheaf". The analysis was carried out by 3D modeling tensely-deformed conditions sintering and grinding area. By results of research it is established, that diamond grinding circles on different bands have initial deficiency as the diamond grains destroyed during sintering. The 3D-models of sintering of diamond tools were developed, taking into account the anisotropy of diamond properties and the shape of grains.*

Создание методологических основ и системы 3D-CAD моделирования алмазно-композиционных материалов (АКМ) на этапах их изготовления и эксплуатации позволит существенно повысить эффективность их обработки и применения. Предлагаемая 3D методология исследования процессов изготовления и эксплуатации АКМ охватывает все основные этапы жизненного цикла изделия.

Как установлено научной школой академика Н.В. Новикова [1], в условиях высокой силовой и тепловой напряженности в зоне спекания алмазные зерна могут разрушаться, изменяя исходную зернистость. Это приводит к изменению исходной характеристики алмазного круга. Основной причиной такого явления следует считать наличие металлических включений в алмазных зернах, что приводит к снижению их прочности и особенно термостойкости при нагреве синтетических алмазов до температуры  $\geq 850^\circ\text{C}$ . Существенное различие в значениях коэффициентов линейного расширения металлофазы и алмазного зерна при нагреве вызывают появление в последних растягивающих напряжений, величина которых может превысить

предел прочности алмаза. В результате этого алмазное зерно разрывается. Чем выше коэффициент термического расширения металлофазы, тем больше напряжения в алмажном зерне и тем больше вероятность его разрушения в процессе спекания алмазного круга.

Алмазные композиции, из которых состоит рабочий слой шлифовальных кругов являются разновидностью композиционных материалов, представляющих собой сочетание разнородных компонентов с четкой границей раздела. Факторами, влияющими на целостность алмазных зерен, являются, прежде всего, технологические особенности изготовления кругов, а также состав спекаемой композиции.

Алмазные зерна определенной марки, зернистости и концентрации, связка определенного типа и марки, в комплексе обуславливают работоспособность инструмента.

Марка связки круга в большой степени определяет технологические режимы спекания алмазоносного слоя. Поэтому влияние ее свойств и режимов спекания на 3D напряженно-деформированное состояние алмазоносного слоя является взаимосвязанным.

Для изучения влияния концентрации алмазных зерен в круге на их НДС в процессе спекания алмазные зерна моделировались в форме октаэдров, а величина концентрации задавалась расстоянием между зернами.

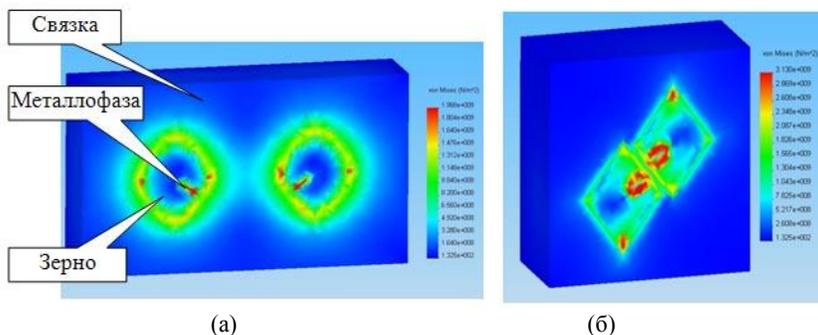


Рисунок 1 — Поля напряжений в системе «алмазное зерно- металлофаза- связка» при 100% (а) и 200% (б) концентрации алмазов в круге.

Концентрация алмазных зерен в спекаемом алмазоносном слое влияет на напряженно-деформированное состояние его составляющих путем изменения контактных напряжений в системе (рисунок 1). С увеличением концентрации зерен возрастает вероятность наложения полей напряжений соседних зерен, что может привести к появлению критической величины напряжений и разрушению зерен (рисунок 1).

Проведенные теоретические исследования показали, что температура спекания алмазоносного слоя оказывает наибольшее влияние на НДС

алмазное зерно-связка. 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.

Ранее, при исследовании 3D НДС системы «зерно-металлофаза-связка» расчетная модель строилась на основании допущения относительно изотропности свойств всех материалов системы [7]. Однако известно, что кристалл алмаза, как и поликристаллическое образование, обладает существенной анизотропией свойств. В литературе [3] приведены результаты испытаний с целью выявления свойств алмаза при различных ориентациях. В наших расчетах принят вариант, при котором модуль упругости при воздействии на одну из трех плоскостей сдвига  $\{110\}/\{111\}/\{101\}$  равняется соответственно 900/750/700 МПа. Результаты расчетов, представленные на рисунок 2 (а, б, в) отображают НДС системы «зерно-металлофаза-связка» при ориентировании фронтальной плоскости в качестве плоскости кристалла  $\{110\}$ ,  $\{111\}$  и  $\{101\}$  соответственно.

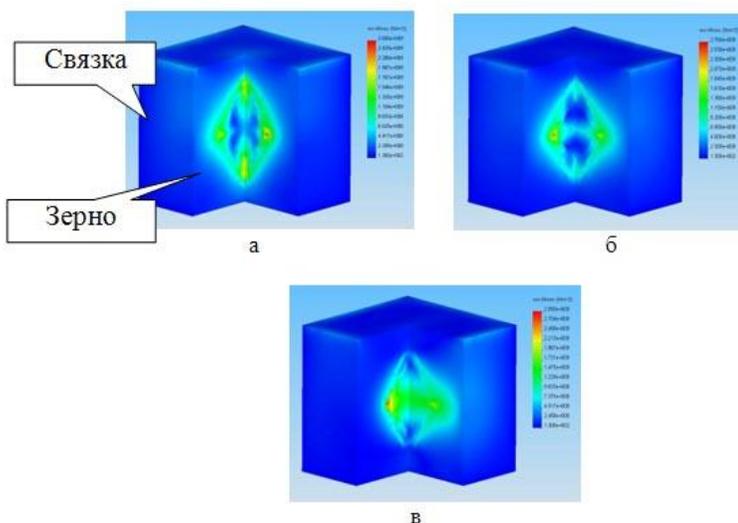


Рисунок 2 — Распределения напряжений в 3D модели «зерно-металлофаза-связка» с учетом анизотропии свойств алмаза при ориентировании фронтальной плоскости в качестве плоскости кристалла  $\{110\}$  (а),  $\{111\}$  (б) или  $\{101\}$  (в)

Таким образом установлено, что анизотропия свойств алмазных зерен может оказывать существенное влияние на их технологические свойства.

После моделирования процесса спекания кругов и определения рационального сочетания марки алмазных зерен их зернистости и

концентрации с соответствующей маркой связки приступили к моделированию процесса шлифования этими кругами.

Эффективность процесса алмазного шлифования кругами на различных связках в большой степени определяется стабильностью параметров их рабочей поверхности. Принципиальной особенностью процесса шлифования СТМ является равенство по твердости инструментального и обрабатываемого материалов (ОМ) [5]. Известно, что обработка сверхтвердых поликристаллических материалов сопровождается высокими значениями удельного расхода алмазных кругов [4]. Для изучения НДС в зоне шлифования при заточке инструмента из СТМ были использованы расчетные комплексы ANSYS, LS-DYNA, Cosmos, Third Wave AdvantEdge. При построении 3D-моделей, имитирующих процесс резания применялась система автоматизации проектных работ (САПР) SolidWorks. Была построена 3D-модель «связка – зерно – металлофаза – обрабатываемый материал». В исходной модели была использована керамическая связка, кобальтовая металлофаза, алмазное зерно и заготовка из медного сплава. Заготовка и фрагмент связки представлялись в виде пластин, а алмазное зерно в форме 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 (рисунок 3).

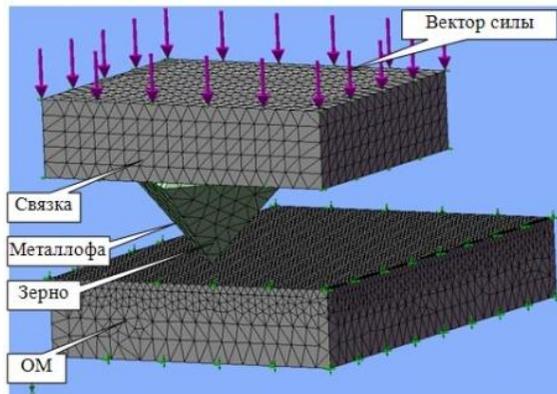


Рисунок 3 — 3D-модель «связка – зерно – металлофаза – ОМ» с конечно-элементной сеткой

Задачей исследования было определение влияния температуры в зоне резания на целостность алмазного зерна, путем определения его НДС. В исходной модели рассматривалось алмазное зерно марки АС100 (200/160), максимальное растягивающее напряжение для которого  $\sigma_{\text{раст}}=2,18$  ГПа. Согласно данным Н.В. Новикова [1], прочность кристалла природного алмаза

при сжатии составляет 12,9 ГПа. Кроме того, прочность кристаллов существенно зависит от их размеров и совершенства строения. В первой части расчетов моделировалось лишь усилие прижима алмазного зерна от 1 до 4 Н, во второй части расчетов к усилию прижима добавлялась температурная нагрузка на алмазное зерно величиной 500 и 800°C.

Распределение напряжений в алмажном зерне в зависимости от усилия прижима отображено на рисунке 4.

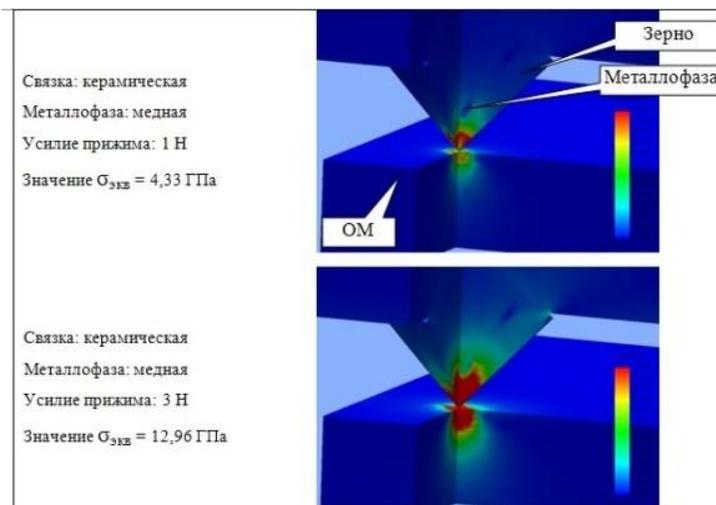


Рисунок 4 — Распределение эквивалентных напряжений при различных усилиях прижима алмазного зерна

Результаты расчета показали, что с увеличением усилия прижима круга к заготовке от 1Н до 3Н приведенные напряжения в зерне возрастают примерно в 3 раза.

Как установлено ранее [7], существенно влияние на эффективность шлифования СТМ оказывает концентрация алмазных зерен в круге. Для моделирования влияния концентрации созданы 3D модели системы «СТМ – зерно-металлофаза-связка-ОМ», в которых концентрация задавалась изменением расстояния между алмазными зернами. Установлено, что увеличение концентрации от 100% до 200% приводит к росту напряжений в местах соприкосновения алмазных зерен и небольших мостиках связки между ними (рисунок 5). Это приводит к разрушению удерживающего объема связки и выпадению еще целых алмазных зерен. Поэтому для снижения вероятности наложения полей напряжений следует уменьшать концентрацию зерен в куге, как видно из рисунка 5 (б).

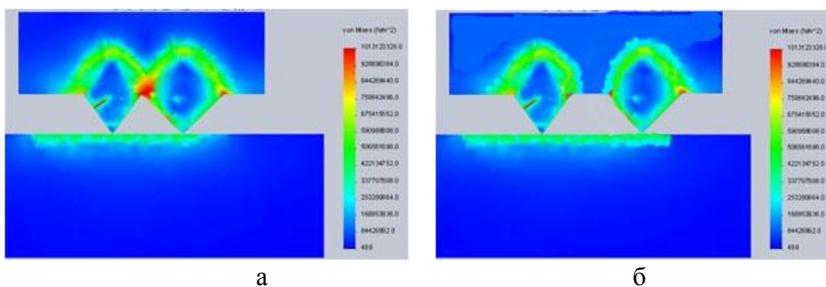


Рисунок 5 – Результаты расчета 3D НДС в системе «зерно-связка-металлофаза-ОМ» при 100% (а) и 75% (б) концентрации алмазных зерен в круге

Для изучения НДС системы «зерно-связка-металлофаза-ОМ» при динамических нагрузках были проведены исследования при помощи вычислительного комплекса ANSYS. Ранее динамические исследования проводились на 2D моделях для единичного зерна без заделки его в связке и при отсутствии металлических включений [7].

Влияние скорости соударения элементов системы «зерно-связка-металлофаза-ОМ» представлены на рисунке 6 (а, б).

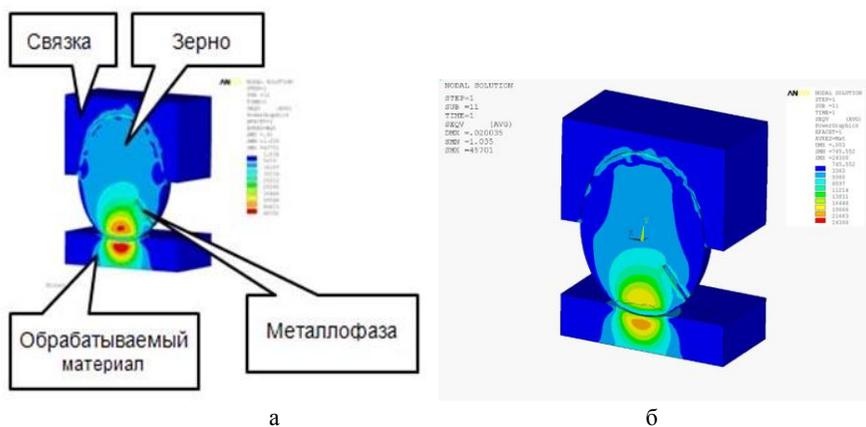


Рисунок 6 – Результаты расчета 3D НДС в системе “зерно-связка-металлофаза-ОМ” при скорости соударения 20 м/с (а) и 40 м/с (б)

Анализ полученных результатов показал, что максимальные напряжения при динамическом моделировании возросли на 20% по сравнению со статическими расчетами, что говорит о необходимости совершенствования моделей с переходом к динамическим модельным экспериментам [6].

Выводы: Впервые при моделировании процесса спекания алмазных кругов учтена анизотропия алмазных зерен, что позволило установить ее существенное влияние на технологические свойства алмазно-абразивных инструментов.

Модельные эксперименты в специализированном пакете программ CosmosWorks по исследованию влияния концентрации алмазных зерен на 3D НДС в зоне шлифования показали, что уже при температурах от 500°C в алмазоносном слое инструмента возникают разрушающие напряжения, прогрессирующие с повышением температур.

Проведенные модельные эксперименты в специализированном пакете программ ANSYS при динамических нагрузках показали, что 3D НДС в системе “зерно-связка-металлофаза-ОМ” существенно зависит от скорости шлифования, марки и количества металлофазы в алмазных зернах. Результаты динамических исследований имеют существенные преимущества по сравнению со статическим моделированием.

**Список использованных источников:** 1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Монография в 6 томах. Том 3: Композиционные инструментальные материалы / Под общей ред. Н.В. Новикова. – Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ “Алкон” НАНУ, 2005. 2. Методы определения показателей качества никелевого покрытия / Гринь Г.И., Козуб П.А., Мухина Л.В., Дробног И.Н. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПИ». – 2006. – № 12. – С. 90 – 94. 3. Yuan Z.J., Yao Y.X. Lapping of Single Crystal Diamond Tools//CIRP Annals - Manufacturing Technology.-2003.-№1.-С.285-288 4. Федорович В.А., Грабченко А.И., Аносов В.И., Малиняк А.М. Теоретический анализ процесса самозатачивания алмазных кругов на органических и керамических связках // Современные технологии в машиностроении: Сборник научных статей/Под ред. А.И.Грабченко.-Харьков: НТУ «ХПИ», 2007.-С.232-247. 5. Frydryšek, K.: Aplikace pravděpodobnostni metody SBRA ve vědeckotechnické praxi(Application of Probabilistic SBRA Method in the Scientific and Technical Practice), written in Czech language, inaugural dissertation in the branch of Applied Mechanics, Department of Mechanics of Materials, FME VŠB-TU Ostrava, Ostrava, CZ, pp.144, 2009. 6. Dmytro Romashov, Jiří Hauptvogel 3D modelling methodology of grinding process by finite element simulation// Computer aided Industrial design Training for Ukrainian Engineers International Conference / – Kyiv/– 25-27 June 2009. –Section Computer Technologies Application; 7. Федорович В.А., Грабченко А.И. Методологія визначення оптимальних характеристик алмазних кругів на етапах виготовлення та експлуатації // Вісник Житомирського державного технологічного університету, вип.2(26), т.2. 2003.- С.46-50.

*Поступила в редколлегию 15.05.2010*