

УДК 621.923

**И.Н. ПЫЖОВ**, д-р техн. наук,  
**В.А. ФЕДОРОВИЧ**, д-р техн. наук, Харьков,  
**В.Г. КЛИМЕНКО**, Полтава, Украина

### **3D МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ АЛМАЗНЫХ КАРАНДАШЕЙ**

Розглянуто питання, пов'язані з особливостями формування напружено-деформованого стану системи «алмазний полікристал - металофаза - металеве покриття». Показано визначальну роль властивостей метала-каталізатора, його процентного вмісту в алмазі, модуля пружності металевого покриття на алмазі в умовах високотемпературного режиму пайки алмазу в корпусі олівця. Встановлено залежність напружень в системі від зазначених факторів і дані практичні рекомендації по виготовленню олівця.

**Ключові слова:** алмазний олівець, люта, металофаза, металеве покриття, 3D моделювання, напружено-деформований стан, теплонапруженість процесу, еквівалентні напруги

Рассмотрены вопросы, связанные с особенностями формирования напряженно-деформированного состояния системы «алмазный поликристал – металлофаза – металлическое покрытие». Показана определяющая роль свойств металла–катализатора, его процентного содержания в алмазе, модуля упругости металлического покрытия на алмазе в условиях высокотемпературного режима пайки алмаза в корпусе карандаша. Установлена зависимость напряжений в системе от указанных факторов и даны практические рекомендации по изготовлению карандаша.

**Ключевые слова:** алмазный карандаш, припой, металлофаза, металлическое покрытие, 3D моделирование, напряженно-деформированное состояние, теплонапряженность процесса, эквивалентные напряжения

The questions linked to the peculiarities of deflected mode of the system "diamond polycrystalline – metallic phase – metal coating" are considered. The defining role of metal- catalyst properties, its percentage content in the diamond, modulus of elasticity of metal coating on the diamond under conditions of high-temperature mode of soldering of diamond in diamond dresser body are shown. It is revealed how stress depends on the above-pointed factors in the system, practical recommendations for the production of diamond dressers are proposed as well.

**Keywords:** diamond dresser, solder alloy, metallic phase, metallic coating, 3D modeling, deflected mode, thermal intensity of process, reduced stress

**1. Постановка проблеми.** Известно, что при шлифовании изделий из различных обрабатываемых материалов (ОМ) широко распространена правка рабочей поверхности абразивных кругов алмазными карандашами. Правка абразивных кругов является одной наиболее распространенных областей использования как монокристаллов (природных и синтетических) так и синтетических поликристаллических алмазов (СПА). И до сих пор достаточно остро стоит задача замены природных алмазов синтетическими без снижения показателей эффективности процесса правки в целом. В связи с

этим исследование в данной предметной области следует считать актуальными и важными для промышленности.

Задачу повышения эффективности процесса правки абразивных кругов можно разделить на два основных направления [1]. Первое направление связано с совершенствованием методов определения оптимальных условий на этапе изготовления алмазных карандашей, а второй – на этапе их эксплуатации. В данной работе рассматривается первое направление.

**2. Анализ последних исследований и публикаций.** Известно [2, 3], что использование компьютерных информационных технологий на всех этапах жизненного цикла изделий (а, значит, и алмазных карандашей) рассматривается как приближение к идеологии CALS-технологии (Computer-Aided Logistics Support). Они обеспечивают компьютерное управление жизненным циклом изделия на всех этапах: разработки концепции изделия; проведения научно-исследовательских работ; проектирования, производства; эксплуатации изделия; модернизации изделия; обеспечения ремонта и технического обслуживания изделия; утилизации.

В настоящее время отсутствует единая комплексная методология трёхмерного (3D-CAD) моделирования физических процессов алмазно-абразивной и лезвийной обработок. Однако уже наметилась четкая тенденция для ее разработки [2], [3]. В перспективе это позволит существенно сократить объём экспериментальных исследований для определения рациональных конструктивных параметров алмазно-абразивных и лезвийных инструментов, оптимальных условий их изготовления и использования. Реализация предложенной последовательности экспериментальным путем является чрезвычайно трудоемким и дорогостоящим процессом.

В нашем случае использование компьютерных технологий на обоих указанных направлениях дает возможность уменьшить время на исследование напряженно - деформированного состояния (НДС) систем «металлическое покрытие - СПА - металлофаза» и «связка круга - алмазное зерно - металлическое покрытие - металлофаза - ОМ », а, следовательно, повысить эффективность научных работ.

В настоящей статье для реализации поставленных задач изучения НДС в зоне обработки и в процессе изготовления инструмента были использованы расчетные комплексы ANSYS, LS-DYNA, Third Wave AdvantEdge, CosmosWorks, Abaqus предназначенные для исследовательских расчетов методом конечных элементов. Для построения 3D-моделей, имитирующих упомянутые процессы, применялась САПР в трёх измерениях (SolidWorks).

**3. Цель исследования.** Установление влияния основных факторов процесса пайки алмазных карандашей на НДС системы «металлическое покрытие - СПА - металлофаза».

**4. Основные материалы исследования.** Известно, что основным методом закрепления алмаза в корпусе карандаша является пайка с

использованием различных, в том числе и достаточно высокотемпературных припоев. В связи с этим основной проблемой при изготовлении алмазного карандаша является высокая температура пайки. Если в алмазе имеются металлические включения (металлофаза), коэффициент линейного расширения которых во многом превышает аналогичный показатель алмаза, то в условиях высокотемпературного воздействия в последнем могут возникать напряжения, величины которых могут превысить предел прочности алмаза. Как следствие, происходит разрушение (растрескивание) СПА [4]. В результате этого алмаз разрывается как бы изнутри [5]. Чем выше коэффициент термического расширения металлофазы, тем больше должны быть напряжения в СПА и тем больше вероятность его разрушения в процессе изготовления или эксплуатации карандаша. Применительно к алмазному карандашу это недопустимо, т.к. может привести как к снижению общего срока его службы, так и браку при обработке (правке). Следует отметить, что в условиях высоких температур важную роль начинают играть физико-механические свойства других факторов, которые входят в отмеченные выше системы.

Известно, что одним из способов защиты алмаза от разрушения является нанесение на их поверхность рельефных толстослойных металлических покрытий [6]. Их наличие на зерне способствует продлению ресурса алмаза по причине лучшего удержания в связке (припое), предотвращению образования в нем макротрещин, «залечиванию» уже имеющихся микротрещин и т.д. Данные последних исследований показали, что еще одним ценным свойством металлического покрытия является способность защитить алмаз (в случае нахождения внутри него металлофазы) от разрушения при воздействии на него высоких температур [7]. Нами было высказано предположение, что аналогичный эффект от покрытия будет наблюдаться и применительно к СПА достаточно крупных размеров.

Для установления влияния различных факторов на НДС системы при пайке алмаза в корпус карандаша было использовано математическое планирование эксперимента. В частности был реализован план второго порядка типа В4. В качестве факторов были приняты: процентное содержание металлофазы (М, %), модуль упругости покрытия на алмазе ( $\mu$ , Н/м<sup>2</sup>), коэффициент термического расширения металла-катализатора (КТР, 1/К), температура пайки алмаза (Т, °С), значения которых представлены в табл. Эти факторы, как показали ранее выполненные исследования [2], оказывают определяющее влияние на уровень НДС в системе «металлическое покрытие - СПА – металлофаза». Толщина покрытия принималась равной 0,1 мм [8].

Отметим, что модель нагружалась только температурным фактором, поскольку при пайке силовой фактор практически отсутствует.

Таблица – Уровни варьирования факторов плана В4

Уровни варьирования факторов	Факторы							
	Содержание металлофазы М, %		Модуль упругости покрытия при 900 °С $\mu$ , Н/м <sup>2</sup>		КТР металла-катализатора (при 900 °С), 1/К		Температура пайки Т, °С	
	Натуральное значение, %	Кодированное значение X1	Натуральное значение, Н/м <sup>2</sup>	Кодированное значение X2	Натуральное значение, 1/К	Кодированное значение X3	Натуральное значение, °С	Кодированное значение X4
Верхний уровень	10	+1	3.0E+011	+1	45.0E-06	+1	1400	+1
Основной уровень	5	0	2.0E+011	0	25.0E-06	0	1000	0
Нижний уровень	0	-1	1.0E+011	-1	5.0E-06	-1	600	-1

На рис. 1 представлена визуализация результатов моделирования по влиянию выбранных факторов на НДС зоны пайки алмазного карандаша.

Эти данные показывают картину распределения напряжений в системе «металлическое покрытие – СПА – металлофаза». Они наглядно свидетельствуют, 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. При расположении включений металлофазы вблизи друг от друга наблюдается усиление полей напряжений в результате их наложения, а их распространение достигает 40% от объема зерна. Это, как правило, приводит к разрушению значительного объема алмазного зерна.

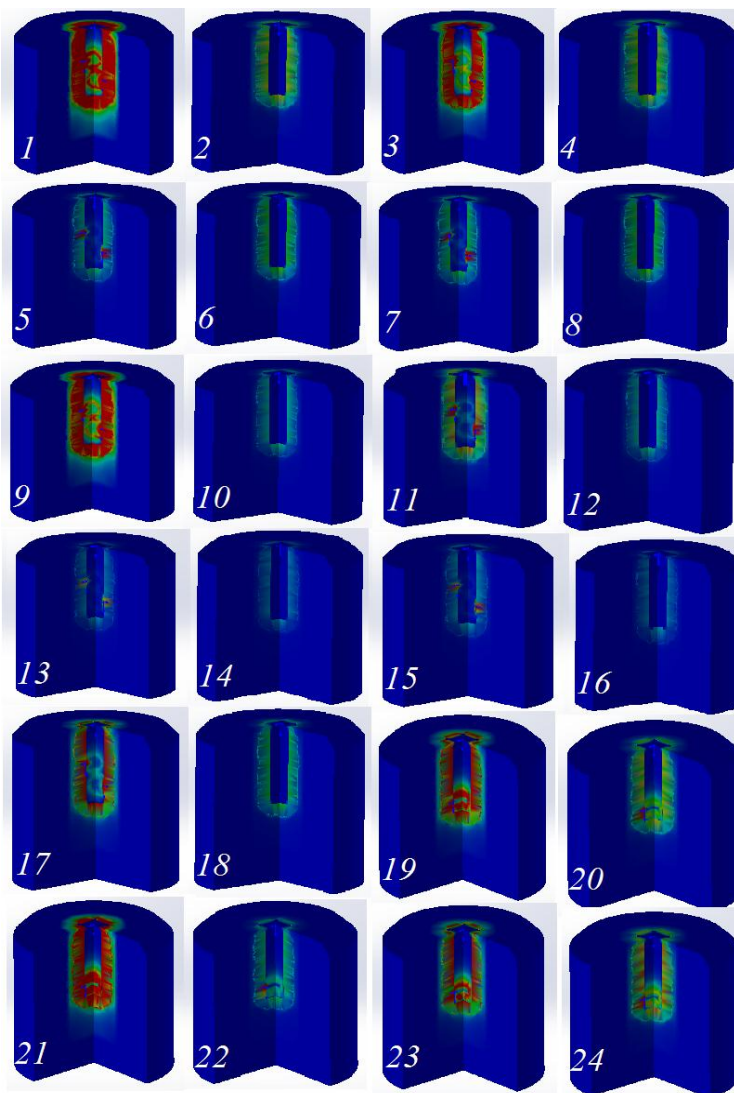


Рисунок. 1 – Визуалізація результатів моделювання НДС системи «металічне покриття – СПА – металлофаза»

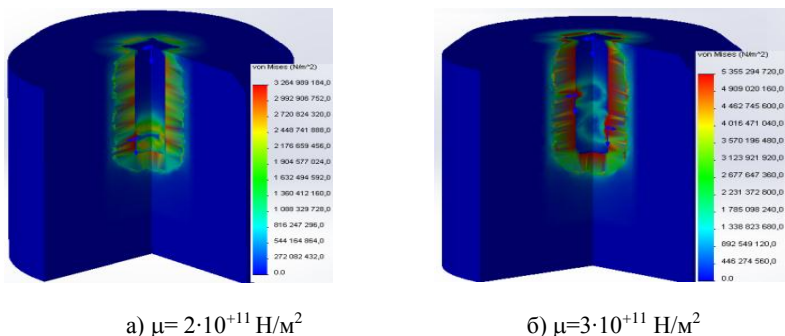


Рисунок 2 – Влияние модуля упругости покрытия на НДС системы «металлическое покрытие – СПА – металлофаза»

На рис. 2 представлена визуализация НДС системы «металлическое покрытие – СПА – металлофаза» в зависимости от модуля упругости ( $\mu$ ) металлического покрытия. Моделирование показало, что с повышением значения  $\mu$  напряжения в системе возрастают. Этот факт можно считать подтверждением того, что покрытие на алмазе может играть защитную функцию в условиях высокотемпературного процесса пайки СПА в державке алмазного карандаша.

Очевидно, что в случае нахождения в составе СПА минимального количества металлофазы (или при ее практическом отсутствии) НДС системы будет минимально (ввиду отсутствия очага возникновения значительных напряжений), что подтверждается результатами моделирования (опыты 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 и 18). Учитывая, что предел прочности алмаза на растяжение составляет примерно 2,0 ГПа, можно сделать вывод о том, что СПА, в составе которых практически нет металлофазы, при пайке с температурой  $\leq 1500^\circ\text{C}$  не должны претерпевать микро- или макроразрушение, что позволяет использовать для их пайки высокотемпературные (и, как правило, высокопрочные, хорошо удерживающие алмаз в державке) марки припоев, что очень важно с точки зрения технологии изготовления правящих карандашей. Таким образом, данные, представленные на рисунках 1 и 2, подтверждают тот факт, что максимальные напряжения концентрируются на границах включений металлофазы. В случае превышения ими предела прочности алмаза может инициироваться процесс развития внутренних трещин в СПА, которые, в свою очередь, могут привести к макроразрушению поликристалла в целом (т.е. к отбраковке изделия).

Здесь следует отметить, что уже существуют способы изготовления синтетических поликристаллов алмаза, которые практически не имеют в своем составе металлофазы, а по физико-механическим свойствам в

максимальной степени приближаются к природным алмазам. Сюда в первую очередь можно отнести CVD метод получения СПА (химическое осаждение из газовой фазы) [9]. Кроме отмеченного выше важным достоинством СПА является отсутствие необходимости ориентации алмаза при закреплении в державке инструмента, поскольку в силу поликристаллического строения СПА имеют одинаковую микротвердость в любом направлении. Такие алмазы в ближайшее время позволят решить актуальнейшую проблему замены природных алмазов во многих отраслях народного хозяйства.

Обработка результатов планируемого многофакторного эксперимента позволила получить математическую модель (в кодированных значениях), адекватно описывающую процесс пайки алмазных карандашей на базе использования различных марок СПА с металлическими рельефными толстослойными покрытиями.

Эта математическая модель процесса пайки алмаза в корпусе карандаша позволяет производить его проверку на не превышение критической температуры и таким образом обеспечить целостность СПА на этапе изготовления алмазного карандаша.

**Выводы и перспективы развития.** 1. Подтверждена определяющая роль температурного фактора в создании уровня НДС системы «металлическое покрытие - СПА - металлофаза». 2. Подтверждена важная роль количества и коэффициента термического расширения металлофазы в условия высокотемпературного процесса пайки СПА в державке алмазного карандаша. 3. Подтверждена важная роль величины модуля упругости металлического покрытия с точки зрения обеспечения целостности СПА при пайке СПА в корпусе алмазного карандаша. 4. Подтверждена перспективность использования алмазов, полученных методом CVD в различных инструментах, при изготовлении которых используются высокотемпературные режимы.

В дальнейшем представляет определенный интерес вопрос оптимизации процесса изготовления алмазных карандашей на базе полученной математической модели процесса их пайки.

**Список использованных источников:** 1. *Грабченко А. І.* Деякі особливості дослідження напружено-деформованого стану при виготовленні та експлуатації алмазних вигладжувачів / *А. І. Грабченко, І. М. Піжов, Н. В. Рязанова – Хитровська, В. Г. Клименко* // *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво*. Матеріали XV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. -м. Житомир: 2015. –С. 22-24. 2. *Грабченко А. І.* 3D моделювання алмазно-абразивних інструментів і процесів шліфування : учеб. посібник / *А. І. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович.* – Харків : НТУ «ХПІ», 2006. – 364 с. 3. *Криворучко Д. В.* Моделювання процесів різання методом кінцевих елементів : методологічні основи : монографія / *Д. В. Криворучко, В. А. Залого.* Под общ. редакцией В. А. Залого – Сумы: Университетская книга, 2012. – 450с. 4. *Новиков Н. В.* Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов / *Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н.* – К.: Наук. думка, 1993. – 220 с. 5. *Козакова Н. В.* 3D моделювання при визначенні оптимальних характеристик алмазних кругів / *Козакова Н. В., Наконечный Н. Ф.,*

Федорович В. А. // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – Вип. 1(8). – С. 81-86. **6.** Синтетические алмазы в машиностроении / [Бакуль В. Н., Гинсбург Б. И., Мишнаевский Л. Л. и др.]; под ред. В. Н. Бакуля. - К.: Наукова думка, 1976. – 352 с. **7.** Пыжов И. Н. Научные основы формообразования лезвийных инструментов из поликристаллических сверхтвердых материалов: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Пыжов Иван Николаевич. – Харьков, 2009. – 405 с. **8.** Пат. 74681 Україна, МПК (2012.01) В24 В 53/00. Спосіб виготовлення алмазного олівця / Грабченко А. І., Пижов І. М., Федорович В. О., Клименко В. Г. Власник Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кодратюка - № у 2012 04084; заявл. 03.04.2012; опубл. 12.11.2012. Бюл. № 21. **9.** Пыжов И. Н. Состояние вопроса и перспективы применения алмазов, полученных методом CVD / И. Н. Пыжов, А. В. Васильев, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: 2011. – Вып.80. – С. 226-235.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Grabchenko A. I. Dejaki osoblivosti doslidzhennja napruzhenodeformovanogo stanu pri виготовленні та експлуатації алмазних вигладзхувачів / А. І. Grabchenko, І. М. Pizhov, N. V. Rjazanova – Hitrovs'ka, V. G. Klimentko // Mashinobuduvannya Ukraїni ochima molodih: progresivni ideї – nauka – vїrobnictvo». Materiali XV Vseukraїns'koi molodizhnoi naukovotehnichnoi konferencії. – м. Zhitomir: 2015. – S. 22-24. **2.** Grabchenko A. I. 3D modelirovaniealmazno-abrazivnyh instrumentov i processov shlifovanija : ucheb. posobie / A. I. Grabchenko, V. L. Dobroskok, V. A. Fedorovich. – Har'kov : NTU «HPІ», 2006. – 364 s. **3.** Krivoruchko D. V. Modelirovanie processov rezanija metodom konechnyh jelementov : metodologicheskie osnovy : monografija / D.V. Krivoruchko, V.A. Zaloga. Pod obshhej redakciej V.A. Zalogi – Sumy: Universitetskaja kniga, 2012. – 450s. **4.** Novikov N. V. Soprotivlenie razrusheniju sverhtverdyh kompozicionnyh materialov / Novikov N.V., Majstrenko A.L., Kulakovskij V.N. – K.: Nauk. dumka, 1993. – 220 s. **5.** Kozakova N. V. 3D modelirovanie pri opredelenii optimal'nyh harakteristikalmaznyh krugov / Kozakova N.V., Nakonechnyj N.F., Fedorovich V.A. // Visoki tehnologii v mashinobuduvanni. – Harkiv: NTU «HPІ». – 2004. – Vip. 1(8). – S. 81-86. **6.** Sinteticheskie almazы v mashinostroenii / [Bakul' V. N., Ginsburg B. I., Mishnaevskij L. L. i dr.]; pod red. V.N. Bakulja. - K.: Naukova dumka, 1976. – 352 s. **7.** Pyzhov I.N. Nauchnye osnovy formoobrazovanija lezviynyh instrumentov iz polikristallicheskih sverhtverdyh materialov: Dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.03.01 / Pyzhov Ivan Nikolaevich. – Har'kov, 2009. – 405 s. **8.** Pat. 74681 Ukraїna, MPK (2012.01) V24 V 53/00. Sposib виготовлення алмазного олівця / Grabchenko A.I., Pizhov I.M., Fedorovich V.O., Klimentko V.G. Vlasnik Poltav'skij nacional'nij tehnicnij universitet imeni Jurija Kodratjuka - № у 2012 04084; zajavl. 03.04.2012; opubl. 12.11.2012. Bjul. № 21. **9.** Pyzhov I. N. Sostojanie voprosa i perspektivy primenenijaalmazov, poluchennyh metodom CVD / I.N. Pyzhov, A.V. Vasil'ev, V.G. Klimentko // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: 2011. – Vyp.80. – S. 226-235.