

РАЗРУШЕНИЕ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН ПРИ ШЛИФОВАНИИ*

В.Ю. ПОПОВ, канд. техн. наук, доцент
А.С. ЯНЮШКИН, доктор техн. наук, профессор
А.Н. ХЛЫСТОВ, магистрант
 (БрГУ, г. Братск)

Поступила 3 октября 2016
 Рецензирование 17 октября 2016
 Принята к печати 4 ноября 2016

Попов В.Ю. – 665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40,
 Братский государственный университет,
 e-mail: berkutoff@rambler.ru

Анализ современных трендов в области обработки металлов показывает, что в настоящее время алмазный инструмент находится на пике своей популярности, опережая по количеству поисковых запросов в Интернете инструмент из кубического нитрида бора, карбида кремния зеленого и электрокорунда. Более того, прослеживается тенденция на стабильное увеличение интереса металлообрабатывающей промышленности и машиностроительного комплекса к алмазным шлифовальным кругам. Подобная популярность объясняется тем, что производство на базе последних научных исследований научилось эффективно применять инструмент из синтетического алмаза. Однако, как показала практика, каждый алмаз имеет различные дефекты, которые оказывают характерное воздействие на его разрушение и износ, что следует учитывать при эксплуатации приборов и изделий, содержащих алмазы.

Ключевые слова: комбинированная электроалмазная обработка, синтетический алмаз, адгезия, компьютерная визуализация, молекулярная динамика.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-16-23

Введение

С того момента, как в металлорежущем инструменте стал применяться синтетический алмаз, исследователей интересовали причины образования засаленного слоя на поверхности алмазных шлифовальных кругов. В настоящее время поиск ответа на данный вопрос является актуальным как с точки зрения фундаментальной науки, так и компьютерного моделирования объектов физики твердого тела, что стало возможным в результате стремительного развития информационных технологий, внедрения их во все сферы науки и техники.

Научные работы многих авторов служат основой для расширения технологических возможностей алмазного инструмента при решении актуальных производственных задач во многих

областях науки и техники. Но и они не в полной мере раскрывают физические аспекты образования засаленного слоя. Дело здесь даже не в том, что частично наукой были определены разнообразные способы минимизации засаливания, а в том, что с «самым главным» режущим инструментом – алмазным поиск этих способов все еще не закончен. Поэтому исследователям остается лишь констатировать, что хотя круги из кубического нитрида бора менее пригодны для шлифования керамических, сверхтвердых, труднообрабатываемых материалов, современных инструментальных наноматериалов, производство все же вынуждено было применять их там, где предпочтительнее было использовать алмаз [1].

Вероятно, ответ на данный вопрос можно найти только на стыке разных областей –

* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ, код проекта: 927.

физики твердого тела, материаловедения, синтеза алмаза, резания металлов. Объединить знания и наглядно показать, визуализировать все нюансы процесса резания представляется возможным при помощи компьютерного моделирования шлифования методами молекулярной динамики [2].

Различные аспекты теории и практики технологий шлифования рассмотрены в работах: Г.В. Бокучавы, А.С. Васильева, М.Б. Гордона, А.И. Грабченко, И.П. Захаренко, А.Н. Короткова, С.Н. Корчака, Т.Н. Лоладзе, Г.Б. Лурье, Л.Л. Мишнаевского, А.А. Панова, С.И. Петрушина, В.Н. Подураева, Ю.В. Полянскова, С.А. Попова, А.И. Промптова, Х.М. Рахиянова, С.Г. Редько, А.Н. Резникова, В.В. Рыжова, Ф.М. Седыкина, М.Ф. Семко, А.Г. Суслова, И.Х. Чеповецкого, А.В. Якимова, А.С. Ямникова, П.И. Ящерицина и др. Вопросам обеспечения работоспособности алмазных кругов, а также исследованию контактного взаимодействия посвящены работы ученых: С.Н. Корчака, Е.П. Мельниковой, А.Ю. Попова, Ю.М. Правикова, А.В. Репко, А.Н. Унянина, Л.В. Худобина, С.С. Черепанова, В.С. Шоркина, А.С. Янюшкина, а также ряда зарубежных ученых: J. Badger, Guo Changsheng, P. Chevrier, R.S. Hahn, M. Hitchiner, I. Inasaki, R.I. King, I.D. Marinescu, S. Murphy, G.E. O'Donnell, P. Padilla, W.B. Rowe, O. Sinot, M. Stephen, Taghi Tawakoli, E. Uhlmann и др.

Проблемы физики и материаловедения синтетических алмазов исследованы в работах: Г.Н. Безрукова, Г.П. Богатыревой, Г.Б. Бокия, В.Г. Винса, Ю.А. Ключева, В.А. Надолинного, А.М. Налетова, В.И. Непша, Н.В. Новикова, В.А. Петровского, Д.В. Сивухина, Е.В. Соболева, Н.А. Солоповой, А.Е. Сухарева, А.И. Чепурова, А.А. Ширяева, а также ряда зарубежных ученых: C.R. Miranda, J. Bruley, W. Kaiser, W.L. Bond, J.H. Chen, P.B. Hirsch, P. Pirouz, J.C. Barry. Все авторы согласны с тем, что наличие различного вида дефектов в алмазах оказывает сильное влияние на их физические свойства (механические, магнитные, электрические и пр.) и влияет на их термостойкость [3–8].

Известно, что в процессе комбинированного электроалмазного шлифования на сам шлифовальный инструмент оказывает внешнее воздействие, состоящее из давления в зоне резания, температуры, процессов окисления, влияния электрического тока, электроэрозионных про-

цессов и пр. Соответственно и поведение алмаза, находящегося в шлифовальном инструменте, будет зависеть от характера этого воздействия [9–12].

Методика исследования

В экспериментах применялся алмазный чашечный круг на металлической связке: АС6 80/63 М1 100%, $D = 125$ мм, $b = 15$ мм, где АС6 – шлифпорошок из синтетических монокристаллических алмазов повышенной прочности. С помощью растровой электронной микроскопии исследовался образец поверхности алмазного шлифовального круга после операции шлифования быстрорежущей стали Р6М5. Обработка осуществлялась всухую с целью засаливания поверхности круга [13–15].

Для получения фотографий синтетических алмазов, не участвовавших в процессе резания, а следовательно, находящихся внутри металлической связки шлифовального круга, использовался растровый электронный микроскоп Carl Zeiss EVO50. Образцы с алмазоносным слоем разламывались и изучалась поверхность такого разлома. Подобный подход позволяет также с высокой точностью определить и толщину засаленного слоя, в том числе, если это необходимо, химический анализ ее состава встроенным химическим анализатором EDS X-Act (Oxford Instruments).

Для решения актуальной задачи причин образования засаленного слоя, для предсказательного моделирования в области материаловедения [16] при разработке новых конструктивных и функциональных наноматериалов была осуществлена визуализация ювенильных поверхностей на атомном уровне [2]. Это нашло отражение в компьютерной 3D-графике и видео*, демонстрируя возможности атомистического моделирования статической структуры материалов, а также моделирования процесса их резания.

Таким образом, эксперименты были разделены на две части: в первой части – получались изображения разрушенных (или дефектных) алмазных зерен на поверхности алмазного шлифовального круга, во второй части – эти разрушения (или дефекты) моделировались на атомном уровне и визуализировались.

* Видео размещено на сайте, по адресу: alexiy.nl/category/blc/

Атомистическое моделирование

Традиционное математическое описание не обладает достаточной наглядностью для демонстрации трудных для понимания аспектов атомистической трибологии резания металлов, где одновременно протекают разные по своей физической природе процессы. Единственным способом восполнить этот пробел является молекулярно-динамическое (МД) моделирование. В этой части работы использовались методы молекулярной динамики для визуализации динамических, скоротечных изменений, происходящих при шлифовании, где преобладают процессы, невозможные для непосредственного наблюдения никакими иными инструментальными средствами. Для визуализации поверхностей, в отличие от их молекулярного моделирования, достаточно подобрать масштаб таким образом, чтобы визуальная картина отличалась наибольшей наглядностью тех изменений, которые происходят в атомной структуре во время резания. Было определено [2], что наиболее просто (с точки зрения математического аппарата) реализовать визуализацию ювенильных поверхностей по атомам, когда профили обрабатываемой поверхности и алмазного зерна задаются в виде блока атомов с соответствующей кристаллической решеткой. В этом случае поверхность представляется как плоскость, состоящая из элементарных блоков (кластеров) кристаллических решеток.

Была создана адекватная динамичная (т. е. в движении) 3D-модель царапания алмазным зерном поверхности быстрорежущей стали, основанная на ранее выполненных фундаментальных и прикладных исследованиях [13–15]. Для проверки адекватности моделирования проводилось сравнение профилей, полученных после электроалмазной обработки и МД-моделирования. Сравнение показало достаточно хорошее совпадение параметров поверхностей.

Результаты и обсуждение

При исследовании процесса шлифования [17–20], моделировании его закономерностей [21–24] необходимо учитывать воздействие точечных и объемных дефектов внутри зерна алмаза, так как именно они ответственны за их разрушение и износ. Так, расчетная прочность алмаза с «идеальной» кристаллической структурой достигает $10\,000\text{ Н/мм}^2$, но, как показывает практика, прочность реального алмаза в $100\dots 1000$ раз меньше [25].

При анализе полученных при помощи растровой электронной микроскопии изображений видно (рис. 1), что даже на поверхности не участвовавших в процессе резания алмазных зерен (рис. 1, а), а также на их гранях присутствуют

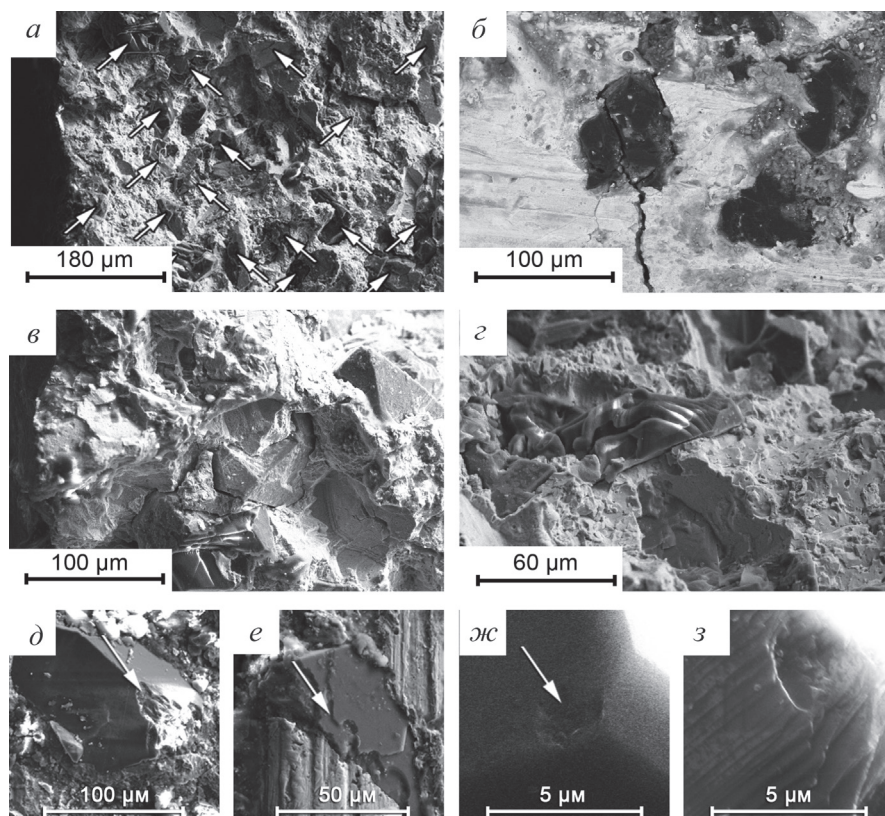


Рис. 1. Внешние картины алмазных зерен в связке шлифовального круга:

а – зерна с нарушениями кристаллической структуры (показаны стрелками); б – зерно, находящееся в засаленном слое и треснувшее вместе с ним в результате внутреннего дефекта; в – зерна в разломе связки со следами объемных микродефектов; г – отдельное зерно в разломе связки со следами пластинчатых дефектов кристаллической решетки; д – объемное разрушение вершины алмаза в виде макроскола; е – износ режущей поверхности алмаза по микрослоям роста, которые находятся в диапазоне $0,2\dots 4\text{ мкм}$; ж – объемное разрушение вершины алмаза в виде микроскола; з – износ режущей поверхности алмаза по нанослоям роста, которые находятся в диапазоне $10\dots 300\text{ нм}$

характерные следы нарушения кристаллической структуры на микро- и макроуровнях. Это свидетельствует о том, что алмазными зернами дефекты приобретаются во время их синтеза и последующего отжига, о чем неоднократно упоминали авторы работ [3–12]. Эти дефекты при совокупном воздействии высокой температуры и увеличении сил резания при шлифовании взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью на атомном уровне.

Однако несмотря на сами дефекты, большинство алмазных зерен шлифовального круга во время шлифования все-таки сохраняют свою форму и целостность, пусть она и несет на себе следы «неидеальной», синтетической природы. В то же время существование в зернах разнообразных точечных (рис. 2, *а, б*) и объемных (рис. 2, *в, г*) дефектов, а, как правило, их совокупности (рис. 1, *в*) и являются причиной определенного характера их разрушения при шлифовании.

Так, объемное разрушение вершины зерна алмаза по расположенным на его поверхности микротрещинам может происходить в виде макроскола (рис. 1, *г, д*) и микроскола (рис. 1, *ж*). Это объясняется тем, что зерно синтетического алмаза, вырастая, формируется из ступеней ро-

ста (рис. 1, *з*), поэтому при шлифовании происходит разрушение поверхности алмаза по его:

– макрослоям, которые находятся в разном диапазоне от 10 до 300 нм (рис. 1, *з, ж*; рис. 2, *г*);

– микрослоям, в диапазоне от 0,2 до 4 мкм (рис. 1, *е*).

Как правило, микро- и макрослои представляют собой блоки кристаллической решетки, между которыми могут располагаться как обычные трещины, так и трещины, заполненные металлическими включениями, что было также учтено при моделировании дефектов на поверхности алмазных зерен (рис. 2, *д, е*).

Следует отметить, что визуализация статической модели алмазного зерна (рис. 2) содержит более 850 тысяч атомов. Этого количества достаточно для того, чтобы в дальнейшем при моделировании процесса резания (шлифования) увеличить глубину проникновения модели алмазного зерна в модель обрабатываемой поверхности. Такой подход позволит на атомном уровне показать, где именно на алмазоносной поверхности начинает образовываться засаленный слой и почему.

Таким образом, комплексное исследование состояния поверхности шлифовального круга показало [13–15], что вне зависимости от условий обработки в связке круга одновременно наблюдаются алмазные зерна с разными видами разрушения и износа. Очевидно, это объясняется тем, что дефекты создают в зернах неравномерные напряжения. В процессе шлифования возникает деформация, вызывающая сближение точечных дефектов, а частицы сошлифованного материала, попадая в микротрещины и провоцируя образование засаленного слоя, распирают их, вызывая тот или иной вид разрушения и износа.

Выводы

Рис. 2. Компьютерная визуализация точечных и объемных дефектов на поверхности алмазных зерен:

а – точечный дефект в кристаллической структуре зерна; *б* – множество точечных дефектов на поверхности зерна; *в* – совокупность пластинчатых (объемных) и точечных дефектов; *г* – ступени роста; *д* – трещина в зерне, содержащая внутрикристаллические металлические включения сплава-растворителя; *е* – трещина в зерне

1. Разрушение алмазного зерна происходит, как правило, по объемным дефектам, имеющим протяженность от нанометров до нескольких микрометров и представляющим собой блоки кристаллической решетки, между

которыми располагаются как обычные трещины, так и трещины, заполненные металлическими включениями.

2. Разрушение алмазного зерна при шлифовании происходит в результате взаимодействия на атомном уровне процесса образования засаженного слоя с дефектами в алмазных зернах.

Список литературы

1. Rowe W.B. Principles of modern grinding technology. – 2nd ed. – Oxford: Elsevier, 2014. – 480 p. – ISBN: 978-0-12-810166-7.

2. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Атомная визуализация алмазного резания // Компьютерные исследования и моделирование. – 2016. – Т. 8, № 1. – С. 161–172.

3. Voidites in polycrystalline natural diamond / J.H. Chen, D. Bernaerts, J.W. Seo, G. Van Tende-loo, H. Kagi // Philosophical Magazine Letters. – 1998. – Vol. 77 (3). – P. 135–140. – doi: <http://dx.doi.org/10.1080/095008398178561>.

4. Включения в кристаллах синтетических алмазных высокопрочных порошков / Н.В. Новиков, Г.П. Богатырева, Г.Д. Ильницкая, Г.Ф. Невструев, Г.А. Петасюк, В.Н. Ткач, Р.К. Богданов, А.М. Исонкин, А.П. Загора, И.Н. Зайцева // Физика и техника высоких давлений. – 2009. – Т. 9, № 2. – С. 48–53.

5. Фундаментальные и прикладные исследования микро- нанополикристаллических алмазных агрегатов и их практическое применение / В.А. Петровский, А.Е. Сухарев, В.П. Филоненко, С.Н. Виноградов // Минералого-технологическая оценка месторождений полезных ископаемых и проблемы раскрытия минералов: сборник статей по материалам V Российского семинара по технологической минералогии. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. – С. 190–196. – ISBN 978-5-9274-0460-5.

6. Винс В.Г. Оптически активные дефекты в алмазе – закономерности образования и взаимной трансформации: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2011. – 252 с.

7. Ширяев А.А. Дефекты и микровключения в алмазах как индикаторы условий кристаллообразования и постростовых изменений: дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.21 / Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет». – М., 2013. – 251 с.

8. Солопова Н.А. Кристаллизация алмаза в карбонатных расплавах минералогического значения (эксперимент при 5,5–84,0 ГПа): дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.05 / Федеральное государ-

ственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет». – М., 2014. – 112 с.

9. Зависимость прочности алмазных шлифпорошков от структуры кристаллов алмаза / Н.В. Новиков, Г.П. Богатырева, Г.Ф. Невструев, Г.Д. Ильницкая, И.Н. Зайцева // Физика и техника высоких давлений, 2007. – Т. 17, № 2. – С. 96–99.

10. Влияние прочностных характеристик алмазных шлифпорошков на работоспособность бурового инструмента / Н.В. Новиков, Г.П. Богатырева, Р.К. Богданов, Г.Д. Ильницкая, А.М. Исонкин // Сверхтвердые материалы. – 2009. – № 6. – С. 75–80.

11. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении / П.В. Зыбинский, Р.К. Богданов, А.П. Загора, А.М. Исонкин. – Донецк: Норд-Пресс, 2007. – 244 с.

12. Влияние обработки высоковольтным электрическим разрядом на морфометрические характеристики алмазных порошков / Г.П. Богатырева, О.Н. Сизоненко, Н.А. Олейник, Г.А. Петасюк, Г.Д. Ильницкая, В.С. Шамраева, Г.А. Базалий, Э.И. Тафтай, А.Д. Зайченко, А.С. Торпаков, Е.В. Липян // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сборник научных трудов. – Киев: Изд-во ИСМ им. В.М. Бакуля НАН Украины, 2011. – Вып. 14. – С. 272–277.

13. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Zamashchikov Y.I. Diffusion phenomena in the combined electric diamond grinding // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 799–800. – P. 291–298. – doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.799-800.291](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.799-800.291).

14. Popov V.Y., Yanyushkin A.S. Adhesion-diffusion interaction of contact surfaces with the treatment diamond grinding wheels // Eastern European Scientific Journal. – 2014. – N 2. – P. 301–310. – doi: [10.12851/EESJ201404ART46](http://dx.doi.org/10.12851/EESJ201404ART46).

15. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels // International Journal of Advances in Machining and Forming Operations. – 2012. – Vol. 4, N 1. – P. 91–102.

16. MD simulation of cluster-surface impacts for metallic phases: soft landing, droplet spreading and implantation / K. Kholmurodov, T. Ebisuzaki, I. Puzynin, W. Smith, K. Yasuoka // Computer Physics Communications. – 2001. – Vol. 141, iss. 1. – P. 1–16. – doi: [10.1016/S0010-4655\(01\)00292-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4655(01)00292-2).

17. Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов / В.Ю. Попов, А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, В.Ю. Скиба // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 3 (23). – С. 68–74.

18. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeebe, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30,

iss. 12. – P. 1408–1411. – doi: 10.1080/10426914.2014.973595.

19. Шлифовальный инструмент на основе силикокарбида титана / Г.И. Смагин, В.Н. Филимоненко, Н.Д. Яковлев, М.А. Корчагин, В.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 1. – С. 27–30.

20. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю.* Повышение поверхностной микротвердости стали при интеграции поверхностно-термической и финишной механической обработок // Научный вестник НГТУ. – 2006. – № 3. – С. 187–192.

21. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Пушкин В.Н.* Методика назначения режимов обработки при совмещении операций абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 4. – С. 19–25.

22. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Yu. Skeebe, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyshkin, K.A. Parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 126. – P. 012016. – doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016.

23. *Ivancivsky V., Parts K., Popov V.* Depth distribution of temperature in steel parts during surface hardening by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 129–135. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.129.

24. *Zamashchikov Y.I.* Duality in metal cutting: impact to the surface layer residual stress // Materials and Manufacturing Processes. – 2006. – Vol. 21, iss. 5. – P. 551–566. – doi: 10.1080/10426910500471706.

25. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Физматлит, 1970. – 565 с.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4 (73), October – December 2016, Pages 16–23

About a destruction of diamond grains in the grinding process

Popov V.Y., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: berkutoff@rambler.ru

Yanyushkin A.S., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: yanyushkin@brstu.ru

Khlystov A.N., Master's Degree student, e-mail: alexey.khlystov@gmail.com

Bratsk State University, 40 Makarenko, Bratsk, 665709, Russian Federation

Abstract

An analysis of modern trends in the area of metal processing shows that at the moment the diamond tool is at the peak of its popularity. It can be confirmed by the fact that the diamond tools are stay ahead in the number of search queries on the Internet. It leaves behind tool made of cubic boron nitride, silicon carbide and green silicon carbide. Moreover, there is a tendency on the steady increase of interest to the diamond grinding wheel in the metal processing industry and mechanical engineering complex. This popularity is due to the fact that manufacturing based on the latest research learned how to effectively use the tools of synthetic diamond. However, experience shows that almost every diamond has various defects that have a characteristic influence on its destruction and deterioration that should be considered in the operation of devices and products containing diamonds. Defects occur in diamond crystals during its synthesis, give rise to the formation of more complex defects that occur in the operational process of diamonds. Under external influence these defects have immediate strong effect on production characteristics of devices, products or instruments containing diamonds. The analysis of the scanning electron microscopy images shows that even on the surface of the diamond grains and on their edges that are not involved in the process of cutting, there are typical traces of lattice disturbance both on micro and macro levels. This indicates that disturbance of the diamond grains usually happens due to bulk defects, which have a length of several nanometers to micrometers, and represent blocks of the crystal lattice, between which cracks and cracks are usually filled with metallic inclusions. A visualization method, developed on the basis of modern digital technology and molecular dynamics, shows it for atomic-scale.

Keywords

combined electro-diamond grinding, synthetic diamond, adhesion contact, computer simulation, molecular dynamics.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-16-23

References

1. Rowe W.B. Principles of modern grinding technology. 2nd ed. Oxford, Elsevier, 2014. 480 p. ISBN 978-0-12-810166-7.
2. Popov V.Y., Khlystov A.N., Bondin A.V. Atomnaya vizualizatsiya almaznogo rezaniya [Atomic visualization diamond cutting]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie – Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 161–172.
3. Chen J.H., Bernaerts D., Seo J.W., Tendeloo G. van, Kagi H. Voidites in polycrystalline natural diamond. *Philosophical Magazine Letters*, 1998, vol. 77 (3), pp. 135–140. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/095008398178561>
4. Novikov N.V., Bogatyreva G.P., Il'nitskaya G.D., Nevstruev G.F., Petasyuk G.A., Tkach V.N., Bogdanov R.K., Isonkin A.M., Zakora A.P., Zaitseva I.N. Vkl'yucheniya v kristallakh sinteticheskikh almaznykh vysokoprochnykh poroshkov [Inclusions in crystals of synthetic diamond high-strength powders]. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii – High Pressure Physics and Technics*, 2009, vol. 19, no. 2, pp. 48–53.
5. Petrovskii V.A., Suharev A.E., Filonenko V.P., Vinogradov S.N. [Fundamental and applied study of micro-nanopolycrystalline diamond aggregates and their practical application]. *Mineralogo-tekhnologicheskaya otsenka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh i problemy raskrytiya mineralov: sbornik statei po materialam V Rossiiskogo seminaru po tekhnologicheskoi mineralogii* [Proceedings of V Russian seminar on technological mineralogy “Mineralogical and technological evaluation of useful mineral deposits and problems in mineral opening”], Petrozavodsk, 2011, pp. 190–196. ISBN 978-5-9274-0460-5. (In Russian)
6. Vins V.G. *Opticheski aktivnye defekty v almaze – zakonomernosti ob-razovaniya i vzaimnoi transformatsii*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [The optically active defects in diamond – pattern formation and mutual transformation. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Barnaul, 2011. 252 p.
7. Shiryaev A.A. *Defekty i mikrovklyucheniya v almazakh kak indikator'y uslovii kristalloobrazovaniya i postrosto-voyykh izmenenii*. Diss. dokt. khim. nauk [Defects and micro-inclusions in diamonds as indicators of crystallization conditions and post-growth changes. Dr. chem. sci. diss.]. Moscow, 2013. 251 p.
8. Solopova N.A. *Kristallizatsiya almaza v karbonatnykh rasplavakh mine-ralogicheskogo znacheniya (eksperiment pri 5,5–84,0 GPa)*. Diss. dokt. tekhn. nauk [The crystallization of diamond in carbonate melts mineralogical value (experiment at 5,5–84,0 GPa). Dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 2014. 112 p.
9. Novikov N.V., Bogatyreva G.P., Nevstruev G.F., Il'nitskaya G.D., Zaitseva I.N. Zavisimost' prochnosti almaznykh shlifporoshkov ot struktury kristallov almaza [Dependence of diamond grinding powder strength on structure of diamond crystals]. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii – High Pressure Physics and Technics*, 2007, vol. 17, no. 2, pp. 96–99.
10. Novikov N.V., Bogatyreva G.P., Bogdanov R.K., Il'nitskaya G.D., Isonkin A.M. Vliyanie prochnostnykh kharakteristik almaznykh shlifporoshkov na rabotosposobnost' burovogo instrumenta [The influence of strength characteristics of diamond grits on drilling tool performance]. *Sverkhтвердые материалы – Journal of Superhard Materials*, 2009, no. 6, pp. 75–80. (In Russian)
11. Zybinskii P.V., Bogdanov R.K., Zakora A.P., Isonkin A.M. *Sverkhтвердые материалы v geologorazvedochnom burenii* [Superhard materials in exploration drilling]. Donetsk, Nord-Press Publ., 2007. 244 p.
12. Bogatyreva G.P., Sizonenko O.N., Oleinik N.A., Petasyuk G.A., Il'nitskaya G.D., Shamraeva V.S., Bazalii G.A., Taftai E.I., Zaichenko A.D., Torpakov A.S., Lipyan E.V. [The influence of high-voltage electrical discharge machining on morfomet-torika characteristics of diamond powder]. *Porodorazrushayushchii i metalloobra-batyvayushchii instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniya i primeneniya: sbornik nauchnykh trudov* [Proceedings of the V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine “Rock cutting and metalworking tools – equipment and technology of its manufacture and use”], 2011, iss. 14, pp. 272–277. (In Russian).
13. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Zamashchikov Y.I. Diffusion phenomena in the combined electric diamond grinding. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 799–800, pp. 291–298. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.799-800.291](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.799-800.291)
14. Popov V.Y., Yanyushkin A.S. Adhesion-diffusion interaction of contact surfaces with the treatment diamond grinding wheels. *Eastern European Scientific Journal*, 2014, no. 2, pp. 301–310. doi: [10.12851/EESJ201404ART46](https://doi.org/10.12851/EESJ201404ART46)
15. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels. *International Journal of Advances in Machining and Forming Operations*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 91–102.
16. Kholmurodov K., Ebisuzaki T., Puzynin I., Smith W., Yasuoka K. MD simulation of cluster-surface impacts for metallic phases: soft landing, droplet spreading and implantation. *Computer Physics Communications*, 2001, vol. 141, iss. 1, pp. 1–16. doi: [10.1016/S0010-4655\(01\)00292-2](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(01)00292-2)

17. Popov V.Y., Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., Skeebe V.Yu. Kontaktnye protsessy pri almaznoi obrabotke instrumental'nykh materialov [Contact processes in diamond processing of tool materials]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 3 (23), pp. 68–74.
18. Skeebe V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 12, pp. 1408–1411. doi: 10.1080/10426914.2014.973595
19. Smagin G.I., Filimonenko V.N., Yakovlev N.D., Korchagin M.A., Skeebe V.Yu. Shlifoval'nyi instrument na osnove silikokarbida titana [The grinding tool on a basis titan silicon carbide]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 1, pp. 27–30.
20. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu. Povyshenie poverkhnostnoi mikrotverdosti stali pri integratsii poverkhnostno-termicheskoi i finishnoi mekhanicheskoi obrabotok [Increased surface microhardness of steel in the integration of surface-thermal and mechanical finishing treatments]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 3, pp. 187–192.
21. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu., Pushnin V.N. Metodika naznacheniya rezhimov obrabotki pri sovmeshchenii operatsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh [Methods of appointment processing conditions when combining the operations of abrasive grinding and surface induction hardening]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 4, pp. 19–25.
22. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyshev A.V., Parts K.A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126, p. 012016. doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016
23. Ivancivsky V., Parts K., Popov V. Depth distribution of temperature in steel parts during surface hardening by high frequency currents. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 129–135. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.129
24. Zamashchikov Y.I. Duality in metal cutting: impact to the surface layer residual stress. *Materials and Manufacturing Processes*, 2006, vol. 21, iss. 5, pp. 551–566. doi: 10.1080/10426910500471706
25. Sivukhin D.V. *Obshchii kurs fiziki. Termodinamika i molekulyarnaya fizika* [General physics course. Thermodynamics and molecular physics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1970. 565 p.

Funding

This work performed under the state task. Registration number of research: 927.

Article history

Received 3 October 2016

Revised 17 October 2016

Accepted 4 November 2016