

# Формирование лазерным излучением рабочего слоя абразивных инструментов на основе кубического нитрида бора

Л. Ф. Головки • А. А. Гончарук • А. Д. Кагляк

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

Received: 15 January 2020 / Accepted: 24 February 2020

**Аннотация.** Сообщаются результаты изучения воздействия лазерного излучения с длиной волны 1,06 и 10,6 мкм различной интенсивности на прочность зерен кубического нитрида бора при статическом нагружении. Обсуждаются вопросы использования рассмотренных шлифпорошков в процессах лазерного формирования инструментальных композитов на связках с различной температурой плавления. Рассмотрены методы защиты шлифпорошков от перегрева в процессе формирования абразивного слоя. В работе анализируются проблемы повышения качества таких инструментов и производительности их изготовления, рассматриваются вопросы, касающиеся применения технологии лазерного спекания для изготовления рабочих слоев непосредственно на корпусах инструментов, предназначенных как для шлифовки, так и лезвийной обработки. Освещаются результаты изучения влияния непосредственного и косвенного кратковременного лазерного нагрева на физико-механические свойства кубического нитрида бора, физико-химические процессы, протекающие на границе кристалла КНБ со связкой, материалом корпуса инструмента. Определены критические значения интенсивности лазерного излучения и времени его воздействия, при которых зерна КНБ не теряют своей исходной прочности. Показано, что для снижения термической нагрузки, на зерна КНБ целесообразно предварительно наносить металлические покрытия, повышающие их смачиваемость связкой. Приведены результаты моделирования и экспериментальных исследований процесса лазерного спекания рабочих слоев абразивных инструментов на основе КНБ, определены условия облучения, при которых формируются абразивные слои, в том числе и на реальных инструментах.

**Ключевые слова:** лазерное излучение, спекание, кубический нитрид бора, прочность при статическом нагружении.

## Вступление

Современное промышленное производство различных металлических деталей машин и приборов характеризуется широким применением железоуглеродистых сплавов. Для их обработки с целью формообразования на завершающих шлифовальных, а также отрезных и вырезных операциях наибольшее распространение получили абразивные круги на основе кубического нитрида бора (КНБ). Применение таких кругов позволяет успешно решать проблему качественной и высокопроизводительной обработки не только широкой гаммы инструментальных и конструкционных сталей, но и других железоуглеродистых сплавов. Как известно, монокристаллы КНБ, обладая уникальным комплексом физико-механических и химических свойств, соединяясь по плоскостям спайности в поликристаллы, ребра которых образуют режущие кромки. Высокая теплопроводность и термостойкость КНБ в сочетании с химической инертностью при взаимодействии с железоуглеродистыми сплавами, в противоположность алмазу, обуславливают эффективность его применения. Такая особенность проявляется при обработке быстрорежущих и других инструментальных сталей [1].

Абразивный инструмент представляет собой металлический корпус в виде тела вращения, на периферийной части которого расположен рабочий слой, различной формы и размеров, содержащий композит из зерен КНБ и связки.

Качество инструмента, его эффективность также в значительной мере зависят от механических, физических и химических свойств связки, особенностей межфазных процессов, которые протекают на границе раздела «КНБ – связка» в условиях формирования рабочего слоя инструмента.

Для изготовления таких инструментов применяют технологии, которые отличаются методами формирования рабочего инструментального слоя, способами закрепления зерен абразива [2–6]. Инструментальные композиты получают методами спекания зерен КНБ со связками в пресс-формах,

✉ А. А. Гончарук  
alexgdgin@kpi.ua

гальваническим осаждением или плазменным напылением связки на корпус инструмента с размещенными на нем зёрнами КНБ, жидкофазное спекание композитов прямым пропусканием электрического тока [3]. Каждый из перечисленных способов имеет свои преимущества и недостатки, области целесообразного применения.

Анализируя современное состояние технологий изготовления абразивных инструментов, содержащих КНБ, следует отметить, что они все имеют чрезвычайно низкую производительность (1 круг за 1 – 4 часа). При изготовлении таких инструментов используют ограниченное количество видов связки, температура плавления которых не превышает 300–600 °С, что обусловлено термостойкостью КНБ. Поскольку основными компонентами связок являются олово и медь, которые имеют небольшую твердость и прочность, зёрна КНБ имеют низкое удержание связкой в рабочем слое, что обуславливает низкую его износостойкость, значительно ограничивает производительность процесса резания. К тому же, существующие технологии не позволяют управлять расположением зёрен КНБ, изготавливать однорядные многослойные инструменты. Также важным недостатком существующих технологий спекания инструментов с КНБ является сложность автоматизации процесса изготовления.

Упомянутые проблемы можно было бы решить, применив для спекания композитов с КНБ высококонцентрированные источники энергии – электрический разряд [4], лазерное излучение [5], электронный луч.

Как источник нагрева, лазерное излучение имеет ряд преимуществ: бесконтактно вводить тепловую энергию в материал и строго ее дозировать, осуществлять в широком диапазоне температур сверхскоростной нагрев локальных областей материалов, а за счет быстрого охлаждения формировать высокодисперсные структуры.

Возможности использования лазерного излучения для спекания материалов исследовался рядом авторов [2, 4–7]. В работах [6, 7] изучалось лазерное спекание порошков никеля, молибдена, титана на стальной подложке. Представляет интерес процесс, при котором частицы составляющих композита соединяются друг с другом за счет оплавления лазерным излучением с последующей кристаллизацией тонких их поверхностных слоев [6]. Наибольший интерес получил процесс лазерного жидкофазного спекания, при котором один из составляющих композита находится в твердой фазе, например – абразивный материал.

### Цель работы

Основной задачей данной работы является изучение процесса взаимодействия лазерного излучения различной длины волны и интенсивности с шлифпорошками КНБ разной марки и зернистости, с целью определения области режимов облучения, обеспечивающих сохранение исходных свойств КНБ и формирование высококачественного инструментального композита с металлической связкой.

Решение поставленной задачи позволит, во-первых, разработать высокопроизводительную технологию лазерного спекания инструментальных композитов с КНБ, во-вторых – значительно расширить номенклатуру связок, в том числе тех, температура плавления которых превышает температуру начала окисления КНБ, в-третьих – значительно повысить физико-механические и эксплуатационные свойства инструментов за счет формирования между его корпусом и абразивным слоем металлургической связи.

### Материалы, экспериментальное оборудование и методика проведения исследований

Изучение влияния условий лазерного облучения на свойства кубического нитрида бора проводилось на образцах зёрен различных марок, характеристики которых приведены в таблице 1.

Основной задачей данного исследования является определение максимальных значений температуры прямого лазерного и косвенного нагрева (расплавленной связкой) различных марок шлифпорошков КНБ, при различных режимах облучения, при которых сохраняется их исходная прочность.

Таблица 1

Характеристики исследуемых марок шлифпорошков кубического нитрида бора

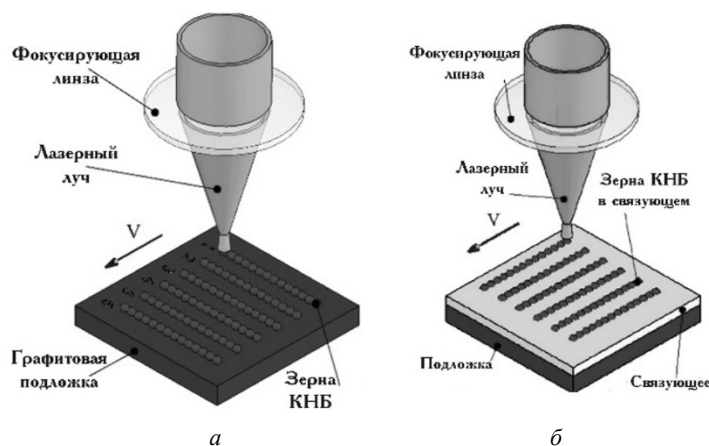
Марка КНБ	Зернистость КНБ	Статическая прочность зёрен, Н	
		Данные измерений	Данные производителя
KB	250/200	15.8	16.0
KB	315/250	12.1	13.2
KP	200/160	8.0	10.5
K9	250/200	25.2	26.0
CBN 100	250/200	13.0	15.0

Экспериментальные исследования проводились на двух технологических комплексах, один из которых оснащен  $YAG:Nd$  лазером с диодной накачкой марки ROFIN DY 044, с излучением  $\lambda = 1.06$  мкм, мощностью  $P$  до 4.4 кВт, другой – газовым  $CO_2$  лазером с длиной волны излучения 10.6 мкм, мощностью до 1.5 кВт. Оба комплекса оснащены технологическими модулями, включающими устройства перемещения обрабатываемых деталей относительно лазерного луча, системы фокусирования и сканирования излучения, устройства дозирования и подачи порошковых материалов. Технологические режимы обработки при использовании излучения с  $\lambda = 10.6$  мкм варьировались в диапазоне: плотность мощности (в зоне облучения) –  $W_p = (0.3 - 6.37) \times 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>, длительность облучения –  $\tau = 0.15-0.450$  с; при использовании излучения с  $\lambda = 1.06$  мкм: плотность мощности –  $W_p = (0.1-1.4) \times 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>, длительность облучения –  $\tau = 0.06-4.5$  с. Лазерная обработка осуществлялась на воздухе и в среде аргона, расход которого менялся в пределах 2–20 л/мин (согласно расходуера).

Одним из параметров, определяющих процесс взаимодействия лазерного излучения с материалом, является поглощательная способность последнего, зависящая от длины волны первого и от температуры последнего. Для определения поглощательной способности были разработаны специальные устройства, работающее на измерении энергии падающего и отраженного от облучаемой поверхности лазерного излучения [8–10]. Для измерения энергии отраженного излучения с  $\lambda = 1.06$  мкм применялся прибор калориметрического типа, для излучения с  $\lambda = 10.6$  мкм – разработанное устройство на базе пирозлектрической полусферы.

Исследовались порошковые металлы и сплавы различной дисперсности. Плотность порошковой смеси, которая была накатана на предметную стеклянную пластину, определяли с помощью измерения толщины ее слоя (расстояния между двумя пластинами), при известной площади и заведомо известной массы порошка. Толщина слоя порошковых материалов – менялась от 0.1 мм до 5 мм. В каждой экспериментальной точке выполнялось по 5 измерений в зависимости от толщины и характеристик облучаемого материала, времени экспозиции. Результаты измерений подвергались стандартной статистической обработке.

Методически поставленная задача воздействия лазерного излучения на зерна КНБ решалась двумя способами – прямым облучением зерен КНБ на графитовой подложке и косвенным – нагревом расплавленной лазерным излучением порошковой связки, в которую предварительно были погружены зерна КНБ (рис. 1, а, б). После облучения часть шлифовальных зерен КНБ (100–200 шт.) подвергали испытаниям на статическую прочность (метод заключается в нагружении одного или многих зерен между опорными пластинами, изготовленными из различных материалов) по стандартной методике на приборе ДА-2 [11]. Зерно помещается между корундовыми пластинами. Прозрачные пластины позволяют наблюдать за зерном через микроскоп. Зерна нагружаются с помощью электродвигателя или через систему рычагов и сосудов с дробью. Основным преимуществом этого метода является простота его реализации. Часть образцов исследовалась с применением методов растровой электронной микроскопии, локального и интегрального рентгеноспектрального элементного анализа на электронном микроскопе ZEISS EVO 50 XVP.



**Рис. 1.** Схемы нагрева зерен КНБ непосредственно лазерным излучением (а) и лазерным излучением в сочетании с косвенным нагревом расплавленной связкой (б)

Изучение влияния лазерного облучения на характер структуры абразивного слоя (дисперсность, однородность, распределение легирующих элементов) проводилось на образцах инструментальных композитов со связками различных систем, которые отличаются температурой плавления и твердостью: ПГ-12Н-01+КНБ; ПС-12НВК, включающая 65 % ПГ-10Н-01 + 35 %  $WC$ , + КНБ; ПГ-19М-01+КНБ; Бр010 ( $Sn-10$  %, остальное  $Cu$ ) +КНБ; механическая смесь – 80 %  $Cu+20$  %  $Sn$  + КНБ.

Механические смеси зерен КНБ и связок, различающихся температурой плавления, увлажненных цапонлаком в виде паст, наносили слоем шириной 3 мм и высотой 0,8 мм в виде отдельных дорожек на графитовые подложки и металлические образцы из стали 45. Сформированные и подсушенные образцы

размещались на рабочих столах установок с системами ЧПУ и обрабатывались лазерным излучением с различной длиной волны по заданной программе.

После лазерной обработки слои композитов подвергались обработке смесью кислот до полного растворения металлических связей. Зерна КНБ отбирались фильтровальной бумагой, промывались, высушивались и исследовались с применением растровой электронной микроскопии и электронографического анализа. Одновременно, используя стандартную методику, проводилось измерение их статической прочности по методике, описанной выше.

### Влияние условий лазерного облучения на прочность зерен КНБ и изучение возможности спекания инструментальных композитов на их основе.

Результаты исследования прямого воздействия лазерного излучения с различной длиной волны на прочность зерен КНБ, обработанных на воздухе и в среде аргона, при статическом нагружении представлены на рис. 2, а, б. При этом исходная статическая прочность исследованных шлифпорошков КНБ составляла: KB 250/200 – 15.8 Н; KB 315/250 – 12.1 Н; K9 250/200 – 25.2 Н.

Анализ результатов измерения статической прочности зерен КНБ исследованных марок при статической нагрузке показал, что они при нагреве излучением с длиной волны  $\lambda = 10,6$  мкм и плотностью мощности  $W_p = (0,2-2,5) \times 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> при скоростях обработки от 0.2 до 2.0 м/мин практически не теряют свою исходную прочность (рис. 2, а).

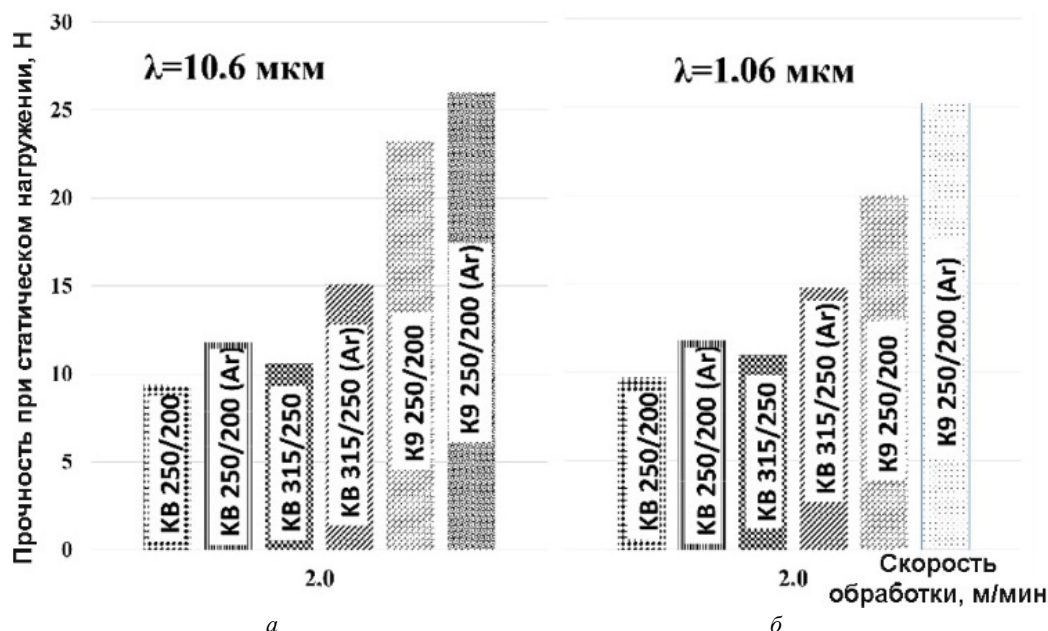


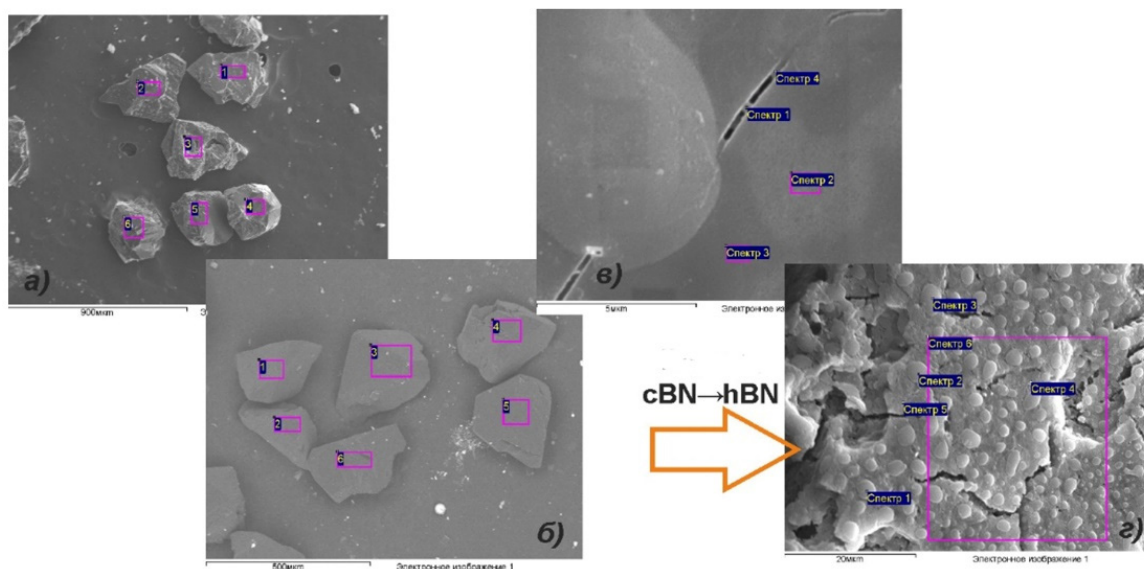
Рис. 2. Прочность зерен КНБ при статическом нагружении, облученных на воздухе и в среде аргона при: а) мощности излучения,  $P = 800$  Вт, диаметре зоны облучения  $d = 3$  мм, скорости относительного перемещения,  $V = 2.0$  м/мин; б)  $P = 500$  Вт,  $d = 3$  мм,  $V = 2.0$  м/мин

В исследуемых выборках встречались зерна белого цвета, имевшие низкую прочность, не превышающую 2,6 Н. Это связано с присутствием в выборках наряду с зернами  $\beta$ -нитрида бора ( $\beta$ -BN) черного и янтарного цвета, имеющего кубическую решетку и высокую твердость, до 10 баллов по Моосу, зерен графитоподобного  $\alpha$ -BN белого цвета, имеющего гексагональную решетку и низкую твердость. Присутствие таких зерен среди массы кондиционных (черного и янтарного цвета) носит случайный характер и требует применения специальных способов их отделения для использования, например, в качестве антифрикционного материала в тяжело нагруженных узлах трения, работающих в условиях вакуума, высоких удельных нагрузках и скоростях скольжения.

Особенности изменения статической прочности зерен, обработанных излучением с  $\lambda = 1.06$  мкм, представлены на рис. 2, б. Снижение статической прочности обусловлено повышенной поглощательной способностью КНБ к излучению этой длины волны, которая еще больше увеличивается в результате окисления его поверхности при обработке на воздухе. При подаче в зону обработки аргона, с расходом до 10 л/мин, прочность зерен КНБ заметно увеличивается (с 20,0 Н до 25,0 Н для K9 250/200), то есть отсутствовало негативное термическое влияние на шлифовальные зерна КНБ.

Применение растровой электронной микроскопии (РЭМ) позволило дополнительно уточнить диапазоны режимов лазерного облучения, при которых сохраняются исходные физико-механические свойства зерен КНБ.

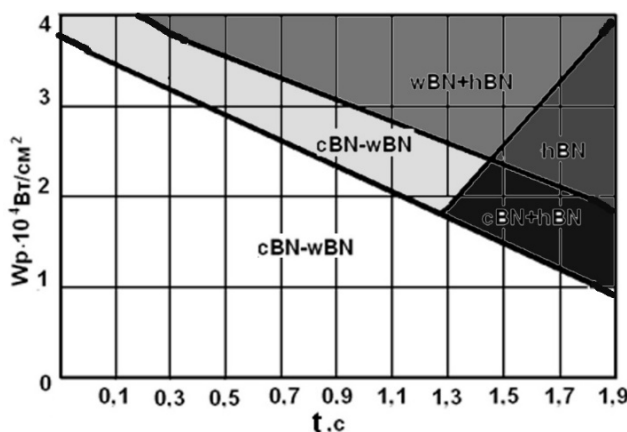
На первом этапе облучения происходит очистка зерен КНБ от продуктов синтеза без отрицательного влияния на показатели прочности (рис. 3, *a, б*). По мере увеличения интенсивности облучения на зернах появляются трещины (рис. 3, *в*), причиной появления которых является различие в коэффициентах термического расширения кристаллов КНБ и металла катализатора (магния, используется при получении порошков КНБ), который выходит на поверхность. При этом инициируется фазовое превращение  $cBN \rightarrow hBN$ , что косвенно подтверждается различием в их цвете (рис. 3, *з*). Данный эффект может быть использован для лазерной сепарации зерен КНБ.



**Рис. 3.** Влияние параметров лазерного излучения с  $\lambda = 1.06$  мкм и условий обработки на свойства зерен КНБ марки KB 250/200: *a* – исходный КНБ; *б* – обработанный при  $P = 300$  Вт,  $V = 0.1$  м/мин,  $d = 3$  мм, защита –  $Ar = 7$  л/мин; *в* – при  $P = 500$  Вт,  $V = 0.1$  м/мин,  $d = 3$  мм, защита –  $Ar = 7$  л/мин (появление трещин); *з* – при  $P = 800$  Вт,  $V = 0.1$  м/мин,  $d = 3$  мм, защита –  $Ar = 7$  л/мин (фазовый переход  $cBN \rightarrow hBN$ )

Данные измерений прочности зерен КНБ подтверждаются результатами рентгеноструктурного анализа. На дифрактограммах, как правило, фиксируются два наиболее интенсивных отображения с интерференционными индексами 111 и 220. Первый максимум с относительной интенсивностью 100% отвечает атомным плоскостям с межплоскостным расстоянием  $d = 2.087 \text{ \AA}$ , зафиксированный на дифрактограммах под углом  $2\theta = 43.360$ . Его интенсивность определяется количеством кубической фазы в насыпке [13–15].

С увеличением плотности мощности в зоне облучения и времени действия пучка излучения наблюдается уменьшение количества кубической фазы и увеличение графитоподобной. Полученные данные позволили определить области фазового состава нитрида бора в зависимости от параметров облучения (рис.4), что дает возможность использовать их для установления рациональных режимов обработки излучением с длиной волны 10,6 мкм.



**Рис. 4.** Фазовый состав нитрида бора в зависимости от параметров лазерного облучения

При исследовании прямого действия лазерного излучения на прочностные характеристики КНБ использовались шлифпорошки, зерна которых были металлизированы медью, никелем и титаном [12, 13]. При этом оценивались их поглощательная способность лазерного излучения и угол смачиваемости зерен КНБ. Показатели прочности исходных и металлизированных шлифпорошков представлены на рис. 5.

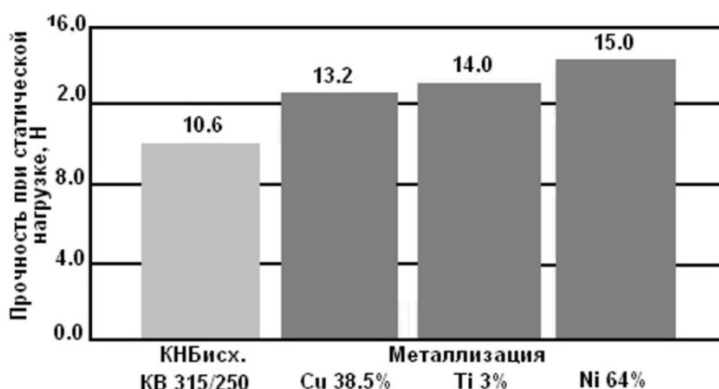


Рис. 5. Разрушающая нагрузка исходных зерен КНБ КВ315/250 и металлизированных медью, титаном и никелем

Как видно из приведенных данных наиболее эффективным является покрытие зерен КНБ никелем, который, не только сохраняет их исходную прочность, но даже существенно ее увеличивает. Кроме того, применение в качестве покрытий никеля или меди будет способствовать улучшению смачиваемости металлизированных поверхностей КНБ наиболее часто применяемыми связками.

#### Моделирование процесса лазерного спекания режущего слоя абразивного круга с КНБ

Структурные и фазовые изменения в исследуемых системах однозначно определяются условиями их лазерного нагрева и последующего охлаждения. Уровень температур, их распределение по объему, скорости нагрева и охлаждения зависят от ряда факторов, связанных как с источником нагрева, так и с характеристиками обрабатываемого материала, условиями их взаимодействия [16–20].

Схема изготовления рабочего слоя круга для абразивной обработки, представляющего собой композит, содержащий зерна КНБ и металлическую связку, с применением лазерного спекания приведена на рис. 6. Стальной корпус круга 1 размещается между двумя медными дисками – матрицами 2. В одной из матриц по кругу изготовлено углубление, форма и размеры которого отвечают форме и размерам слоя композита. В это углубление принудительно доставляется смесь зерен КНБ и металлического порошка связки 3. Под действием сфокусированного лазерного луча 4, сканирующего в радиальном направлении с амплитудой, равной ширине углубления в матрице, расплавляются периферийный слой металлического корпуса круга и порошок связки, перемещающихся относительно луча со скоростью  $V$ . Это приводит к их сплавлению и образованию между ними металлургической связи. Одновременно расплавляется слой связки, в котором размещены зерна КНБ. На этапе охлаждения при температурах, когда связка находится в пластичном состоянии, сформированный слой механически уплотняется специальным металлическим роликом. Для разработки технологии лазерного термодеформационного спекания необходимо определить уровень температур и закономерности их распределения по слою, который спекается, в зависимости от свойств материала матрицы и порошковой смеси, условий лазерного облучения, характеристик их относительного движения.

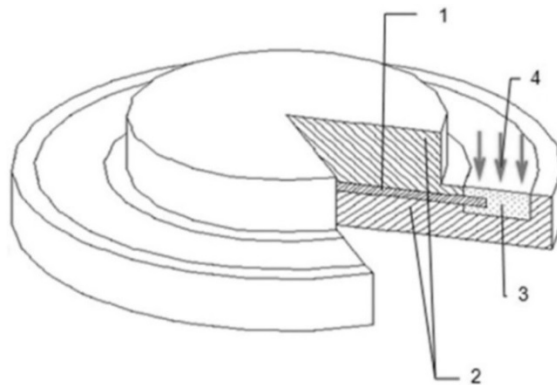


Рис. 6. Схема объекта моделирования

Температурное поле представленного объекта можно описать трехмерным уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах  $r, \varphi, z$ :

$$c\rho \frac{\partial U}{\partial t} = \lambda \left( \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$r \in [r_{нач}, r_{кон}], \varphi \in [0, \varphi_{кон}], z \in [0, L_z], t \in [0, T_{кон}]$$

относительно неизвестной температуры  $U = U(r, \varphi, z, t)$  с начальным условием  $U = U(r, \varphi, z, 0) = U_{нач}$ .

Поскольку объект состоит из материалов трех типов: материал матриц, диска, порошковой смеси-параметры  $c, \rho, \lambda$  зависят от координат и каждый принимает одно из трех значений.

Граничное условие на верхней поверхности физической области в зоне действия лазерного излучения имеет вид:

$$\lambda \frac{\partial U(r, \varphi, z_{БЛ}, t)}{\partial z} + W_p(r, \varphi, t) = 0 \quad (2)$$

вне зоны действия излучения, на этой же поверхности:

$$\lambda \frac{\partial U(r, \varphi, z_{БЛ}, t)}{\partial z} + \alpha [U(r, \varphi, z_{БЛ}, t) - U_c] = 0 \quad (3)$$

Граничные условия на нижней и боковой поверхностях физической области моделируют теплообмен с окружающей средой:

$$\lambda \frac{\partial U(r, \varphi, L_z, t)}{\partial z} + \alpha [U(r, \varphi, L_z, t) - U_c] = 0 \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial U(r_{КОН}, \varphi, z, t)}{\partial r} + \alpha [U(r_{КОН}, \varphi, z, t) - U_c] = 0 \quad (5)$$

Граничные условия на гранях расчетной области при  $\varphi = 0; \varphi = \varphi_{КОН}; r = r_{НАЧ}$  имеют вид

$$\frac{\partial U}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

где  $n$  – направление нормали к поверхности.

В модели использованы следующие обозначения:  $r, \varphi, z$  – пространственные координаты в цилиндрической системе (физическая область);  $x, y, z$  – пространственные координаты в декартовой системе (расчетная область);  $t$  – время;  $z_{вл}$  – координата по оси  $OZ$  зоны влияния излучения;  $r_{нач}, r_{кон}, \varphi_{кон}$  – размеры расчетной области;  $c$  – теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $W_p$  – плотность мощности в зоне облучения;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $U_c, U_{нач}$  – температура окружающей среды и начальная температура объекту.

Пусть плотность мощности в зоне облучения  $W_p$  будет неизменна в пределах зоны, которая имеет вид прямоугольника, длина которого совпадает с размером углубления нижней матрицы (7 мм), а ширина – 0.7 мм (при угле расходимости луча 0.006 рад).

Физическую область (систему цилиндров) можно представить в декартовой системе координат с осями  $Ox, Oy, Oz$ , как расчетную область в виде прямоугольных параллелепипедов (рис. 7), причем координатам  $r, \varphi, z$  отвечают координаты  $x, y, z$ .

Высокий уровень мощности излучения и малые размеры облучаемой зоны приводят к высоким градиентам температурного поля, что существенным образом усложняет процесс моделирования.

Моделирование процесса лазерного спекания абразивного круга проводилось в следующих условиях:

Заготовка инструмента и связка изготовлены из материала: сталь 13X, имеющей следующие теплофизические свойства: удельная теплоемкость –  $c = 0.578$  Дж/г·°C, плотность  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0.26$  Вт/см·°C.

Матрица – материал: “медь М001”:  $c = 0.389$  Дж/г·°C,  $\rho = 8800$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda = 3.85$  Вт/см·°C.

Коэффициент теплоотдачи на внешних поверхностях:  $\alpha = 10$  Вт/м<sup>2</sup>·°C.

Мощность лазерного излучения:  $P_{max} = 1256$  Вт;

Радиус лазерного луча (на поверхности заготовки):  $r_{лп} = 1.0$  мм;

Скорость (перемещения) луча:  $\omega = 0.1$  рад /сек;

Температура окружающей среды и начальная температура объекта:  $U_c = U_{нач} = 20^\circ\text{C}$ .



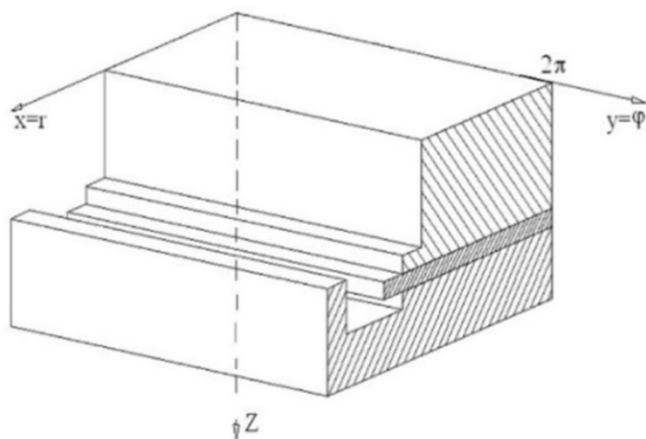


Рис. 7. Расчетная область

Сопоставление результатов моделирования с данными пробных экспериментов относительно величин температур и их распределения по толщине спекаемого слоя позволили скорректировать уровень мощности лазерного излучения и продолжительности облучения, существенно повысив точность. На рис. 8 приведены результаты моделирования одного из вариантов лазерного спекания КНБ содержащего абразивного слоя круга, полученного за один оборот матрицы.

Анализ результатов моделирования показал, что при определенных условиях, используя лазерное излучение, можно последовательно на периферии корпуса круга сформировать слой композита шириной 5–7 мм, толщиной 0,5 – 10 мм и больше, управляя скоростью относительного перемещения и количеством проходов (слоев). На уровень температур порошковой смеси наибольшее влияние оказывает интенсивность излучения.

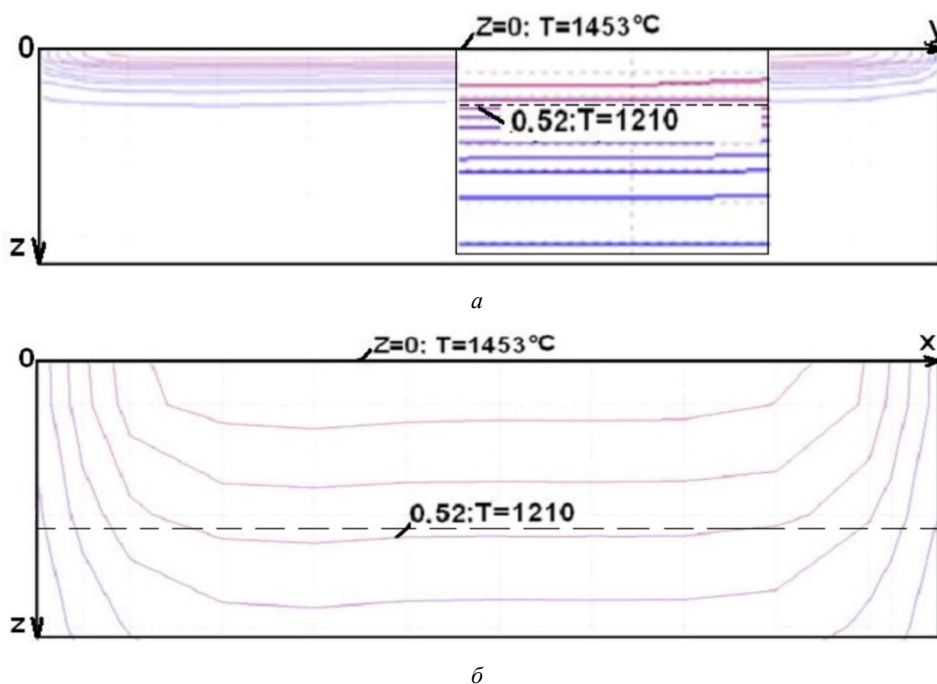


Рис. 8. Распределение температур по толщине спекаемого композита в продольном (а) и поперечном (б) сечениях рабочего слоя абразивного круга (мощность излучения  $P = 1300$  Вт, диаметр луча в зоне облучения на поверхности заготовки  $r_{np} = 1.0$  мм; скорость относительного движения  $\omega = 0.1$  рад/сек)

При спекании композитов со связками, имеющими различную температуру плавления (300–1500°C), управлять их плавлением целесообразно изменением мощности излучения в пределах от 500 до 2000 Вт, оставляя неизменными размеры зоны облучения. Другим важным параметром процесса является толщина спекаемого слоя композита за один оборот, определяемая скоростью относительного движения, меняющаяся в пределах 0.2 – 1 м/мин.



### Влияние условий лазерного селективного спекания на микроструктуру, микротвердость и размерные характеристики инструментального слоя

Базируясь на результатах моделирования, экспериментально изучалось влияние параметров лазерного спекания на геометрию и микротвердость, характер структуры (дисперсность, гомогенность, распределение легирующих элементов) полученных композитов разных систем, отличающихся теплофизическими и физико-механическими свойствами.

При этом использовалось лазерное излучение ближнего и дальнего инфракрасного диапазона. В качестве связок были выбраны расплавленные лазерным излучением и затем закристаллизовавшиеся порошки бронзы (Бр010), порошковые смеси ПС-12НВК, ПГ-12Н-01 и ПГ-19М-01, существенно различающиеся температурой плавления.

Измерение статической прочности зерен КНБ, металлизированных никелем и вытравленных после обработки из связки ПС-12НВК, показало некоторое ее увеличение по сравнению с исходной. В зависимости от условий облучения, толщина слоя никеля на поверхности зерна изменялась с 64% до 150% (дополнительно никель перешел со связки). Последнее обстоятельство существенно увеличивает прочность удержания зерен КНБ связкой в композите.

При спекании композитов лазерным излучением с длиной волны  $\lambda = 10.6$  мкм достаточно эффективно применение связок на основе бронзы Бр010, а также сплава ПС-12НВК (рис. 9, а, б). Сформированные в результате спекания слои композита имеют равномерную шероховатость поверхности и стабильную геометрию. Для них характерна общая закономерность монотонного убывания ширины и толщины абразивного слоя с увеличением скорости относительного движения лазерного луча и подложки. Структура наплавленных слоев, как и их микротвердость плавно переходит в структуру стальной подложки или структуру подплавленного предварительно нанесенного слоя.



**Рис. 9.** Макроструктура поперечного сечения наплавленного слоя связки композита на сталь корпуса круга (увеличение  $\times 100$ ):

а – Бр010 ( $V_{об} = 0.3$  м/мин;  $d_0 = 3$  мм;  $P = 500$  Вт; защитный газ – Ar, расход 7 л/мин;

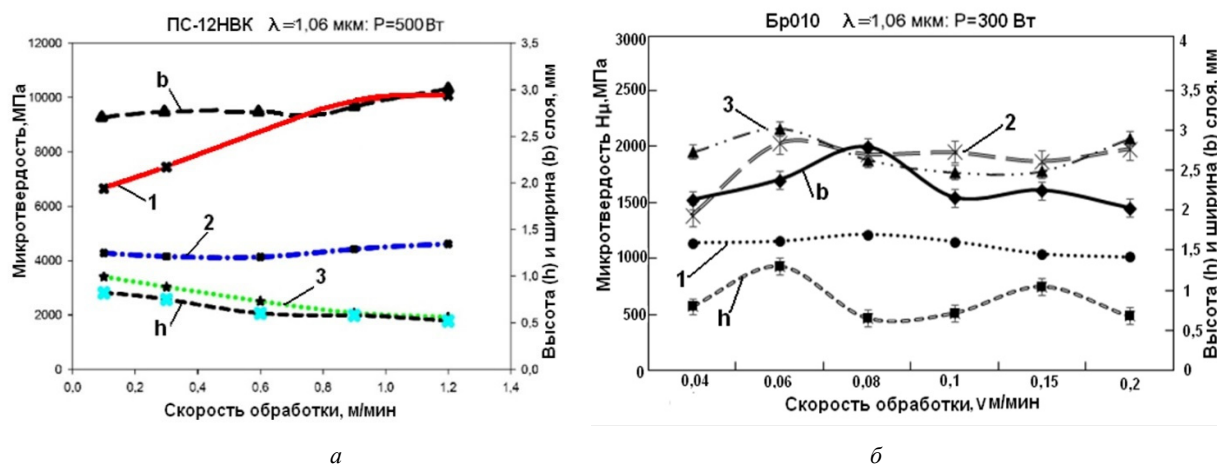
б – ПС-12 НВК ( $V_{об} = 0.2$  м/мин;  $d_0 = 3$  мм;  $P = 500$  Вт; Ar, расход – 20 л/мин)

В композитах со связкой ПС-12НВК, сформированных при действии излучения с длиной волны  $\lambda = 10.6$  мкм, наблюдаются участки с повышенной травимостью со структурой подобной мартенситным иглам. Упрочняющие фазы и  $\gamma$ -фаза ориентированы в направлении отвода тепла. Значение скорости охлаждения в приповерхностном слое, рассчитанная по толщине кристаллов упрочняющей фазы, составляла  $5 \times 10^4 \dots 10^5$  °C/с. Микротвердость сформированных слоев варьируется в пределах (6000 – 10000) МПа, повышаясь с ростом

степени дисперсности их структурных составляющих, ростом доли более твердой эвтектики и твердости матрицы.

Исходный сплав имеет неоднородную структуру, для которой характерна ликвация компонентов, которые содержатся в расплаве, и наличие в междендритных областях и объемах самих дендритов мелких включений карбидных фаз. Межкристаллическое пространство обогащено хромом и титаном. Вольфрам и кобальт в большинстве концентрируются в осях дендритов. Переходная зона имеет дисперсную структуру, состав которой не меняется ни по глубине, ни по объему [21, 22].

На рис. 10 приведены зависимости микротвердости связки, переходного слоя и зоны термического влияния, а также толщины ( $h$ ) и ширины ( $b$ ) слоев композитов на связках ПС-12НВК и Бр010 от скорости относительного движения лазерного луча с длиной волны излучения  $\lambda = 1.06$  мкм, полученных при спекании. Как видно из приведенных зависимостей, толщина слоя композита на связке ПС-12НВК при постоянной мощности излучения (500 Вт) плавно увеличивается с уменьшением скорости перемещения стальной подложки в пределах 0.1 – 1.2 м/мин от 0.4 мм до 0.7 мм. Поперечный размер слоя связки композита определяется условиями лазерного облучения, практически не зависит от скорости перемещения и составляет в среднем 2.8 мм.



**Рис. 10.** Влияние режимов лазерной обработки ( $\lambda = 1.06$  мкм) на микротвердость связки (1), переходного слоя (2), зоны термического влияния (3) и геометрические размеры спекенного слоя ( $h$ ,  $b$ ) при различных скоростях жидкофазного спекания композитов на связках ПС-12НВК (а) и Бр010 (б)

Микротвердость слоя связки, образовавшегося при жидкофазном спекании, с повышением скорости обработки в диапазоне (0,1 – 1,2) м/мин увеличивается с 6500 до 10000 МПа, переходного слоя – практически не меняется, зоны термического влияния – уменьшается с 3500 МПа до 2000 МПа. Полученные данные свидетельствуют о дополнительной возможности управления твердостью связки, а значит о возможности изготовления высокоэффективного инструмента для абразивной обработки более широкой номенклатуры материалов.

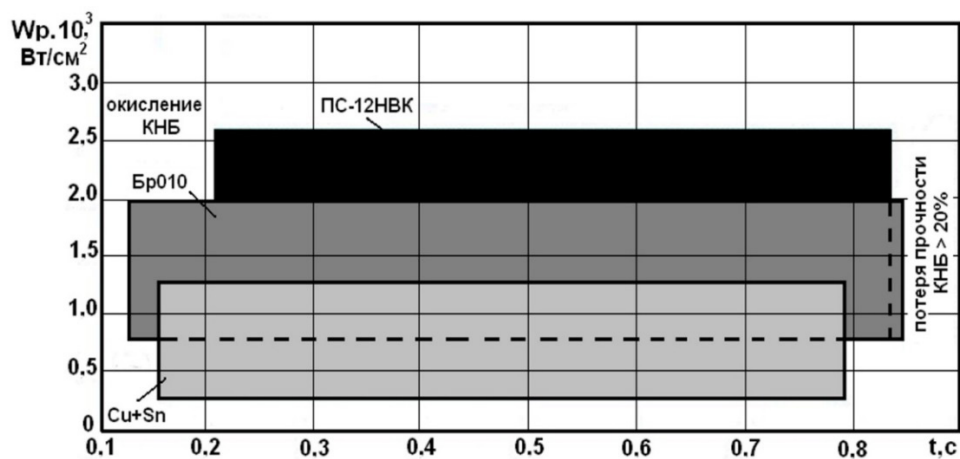
Полученные результаты показали, что стабильное спекание связки композита реализуется при плотностях мощности в зоне лазерного облучения  $W_p = (0.7 - 1.5) \times 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> и скоростях обработки, определяемых мощностью лазерного излучения. При мощности излучения 500 Вт, диаметре зоны облучения 3.0 мм и скорости относительного движения 0.1 – 1.2 м/мин толщина спекенного слоя составила 0.4 – 0.7 мм. С целью дополнительного снижения тепловой нагрузки излучения на зерна КНБ, спекание композита целесообразно осуществлять в среде защитного газа, например, Ar с расходом до 7–14 л/мин, что исключает образование на их поверхностях окисных пленок, повышающих поглощательную способность облучаемых поверхностей. Данное обстоятельство позволяет увеличить долю энергии излучения, расходуемой на оплавление связки, а значит и повысить производительность спекания [23 – 26].

Лазерное жидкофазное спекание композита со связкой Бр010 (рис. 9, б) при мощности излучения 300 Вт позволяет получать при скоростях 0.01 – 0.2 м/мин слой толщиной 0.5–1.0 мм с микротвердостью структуры 1000 – 1100 МПа. На рис. 9, б значения микротвердости переходного слоя и зоны термического влияния (1800 – 2000 МПа) соответствуют микротвердости частично переходного слоя и стальной подложки. Отмечается увеличенная толщина спекаемого слоя по сравнению со связкой на основе ПС-12НВК, что обусловлено более низкими скоростями обработки.

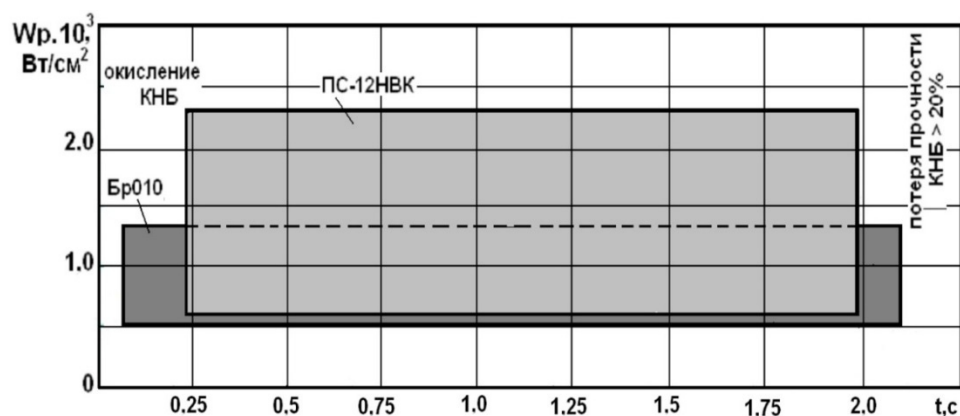
Обобщение данных, полученных при изучении влияния прямого и косвенного действия лазерного излучения с длинами волн ближнего и дальнего инфракрасного диапазона ( $\lambda = 1.06$  мкм и  $\lambda = 10.6$  мкм), позволило установить диапазоны его интенсивности и продолжительности воздействия, в пределах которых

гарантированно реализуется процесс жидкофазного спекания и формируется слой качественного композита (без трещин, пор) с различными геометрическими параметрами (рис. 11, *a*, *б*).

Полученные данные являются основой для разработки технологии изготовления абразивных кругов на основе КНБ различного назначения и размеров с использованием процесса лазерного спекания. При этом корпус кругов различного диаметра и толщины (размер вдоль оси круга) изготавливаются из малоуглеродистых сталей ст.3, сталь 10, 20, 30, режущая часть, толщиной от 0.5 до 10 мм и шириной от 1 до 10 мм (размер вдоль радиуса) – из композита с различным содержанием зерен КНБ. Режущая часть должна иметь определенную геометрическую форму и размеры, заданную концентрацию зерен КНБ и характер их размещения в слое, а также металлургическую связь с материалом корпуса круга.



*a*



*б*

**Рис. 11.** Диапазоны плотности мощности в зоне облучения и продолжительности воздействия лазерного излучения, в пределах которых формируются различные по составу качественные КНБ, содержащие композиты при использовании излучения с длиной волны  $\lambda = 1.06$  мкм (*a*) и  $\lambda = 10.6$  мкм (*б*)

Формирование рабочей части инструмента целесообразно осуществлять послойным лазерным спеканием. Для придания режущему слою определенной формы и размеров процесс спекания целесообразно осуществлять в специальных матрицах. Ввиду различия в удельном весе КНБ и расплава связки, зерна КНБ будут всегда находиться на поверхности последнего. Поэтому при формировании абразивного слоя необходимо предусмотреть принудительное механическое удержание зерен КНБ в связке на определенном уровне. Детальный анализ различных возможных схем формообразования режущей части круга показал, что наиболее эффективными являются две из них, приведенные на рис. 12. Они отличаются друг от друга направлением формирования абразивного слоя – радиальным (рис. 12, *a*) или осевым (рис. 12, *б*). Деформирующий ролик и боковые матрицы обеспечивают геометрические параметры формируемого абразивного слоя.

В соответствии с радиальной схемой спекания металлический корпус круга устанавливается на валу приспособления между двумя формирующими полуматрицами. В зазор между ними в образующее углубление, глубина которого с помощью мальтийского механизма меняется после каждого полного оборота на определенную величину в зависимости от дисперсности зерен абразива, из специальных дозирующих устройств подаются зерна КНБ и порошок связки. Одновременно по мере вращения полуматриц в зазор

между ними подается сфокусированное лазерное излучение, которое в течение первого оборота оплавляет тонкий поверхностный слой корпуса круга и подаваемый из дозатора порошок связки. Затем, в течение следующего оборота во вновь образующийся расплав предварительно закристаллизовавшейся связки подаются

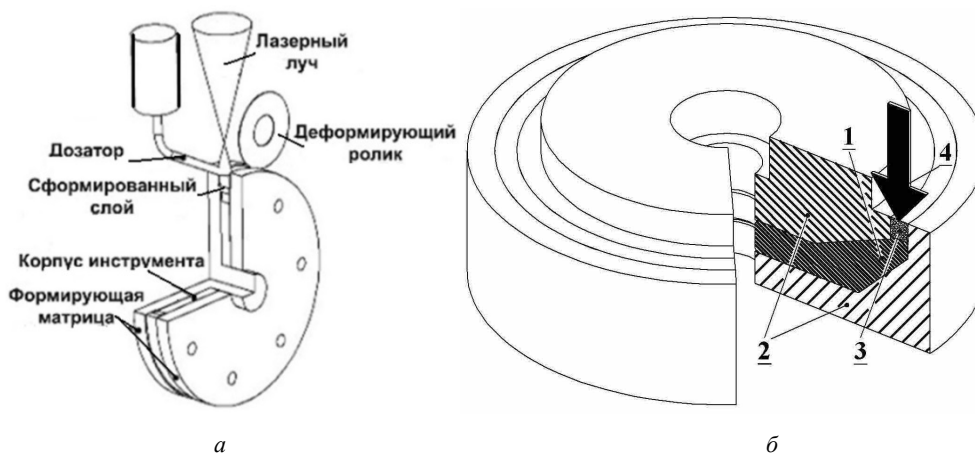


Рис. 12. Схемы устройств для радиального (а) и осевого (б) лазерного термо-деформационного спекания КНБ содержащего слоя абразивного круга

зерна КНБ. Закристаллизовавшийся расплав связки с зернами КНБ на этапе охлаждения принудительно с определенным усилием уплотняется специальным деформирующим роликом. Таким образом последовательно за каждый оборот наращивается КНБ содержащий слой до заданной высоты.

Альтернативное устройство, реализующее схему осевого термомодеформационного спекания, представлено на рис. 12, б.

В водоохлаждаемой цилиндрической полуматрице 2 размещается металлический корпус чашечного круга 1 с возможностью управляемого перемещения вдоль ее оси. Сверху со стороны действия лазерного излучения соосно устанавливается и закрепляется вторая полуматрица, образуя с первой кольцевой зазор, ширина которого соответствует проектной ширине КНБ содержащего слоя 3, а глубина – плавно регулируемая в пределах заданной его толщины. Лазерный луч 4 концентрируется на поверхности корпуса круга и сканирует вдоль радиуса кольцевого зазора с частотой, обеспечивающей равномерность распределения теплового потока. На подплавленную поверхность корпуса в кольцевой зазор из специальных дозирующих устройств подаются металлплавный порошок связки и зерна КНБ. После каждого оборота непрерывно корпус круга опускается относительно наружной полуматрицы на величину, соответствующую величине зерна КНБ. Процесс продолжается до достижения заданной толщины КНБ содержащего слоя.

Для реализации упомянутых выше схем лазерного термомодеформационного спекания КНБ содержащих слоев при изготовлении реальных инструментов были спроектированы, изготовлены и апробированы соответствующие устройства.

В качестве примера на рис. 13, а, б приведены общий вид абразивного круга, рабочий слой которого, содержащий КНБ, сформирован лазерным спеканием. Зерна КНБ равномерно распределены по поверхности рабочего слоя, прочно закреплены в связке, имеют открытые режущие кромки.

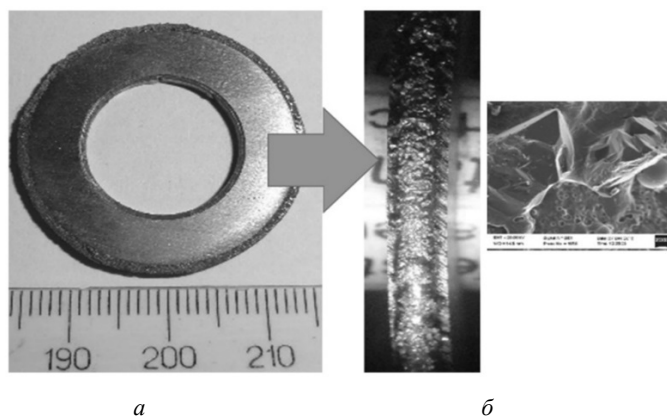


Рис. 13. Абразивный круг, рабочий слой которого, содержащий КНБ, сформирован лазерным спеканием: а – абразивный круг, б – отдельный сегмент абразивного слоя

Триботехнические характеристики наплавленных слоев (величина и характер износа, коэффициент трения) изучались в зависимости от состава спекаемого материала, нагрузки и температуры в условиях сухого трения рис. 14. Исследовались наплавки с Бр010 + К9 250/200 (образец №1); ПГ-19М-01 + КВ 315/250 (образец №2); ПС-12НВК + КР 315/250 (образец №3); Бр010 + КВ 315/250 (образец №4); ПС-12НВК + КВ 315/250 металлизированные никелем (образец №5) на сталь 45. Испытания проводились при нагрузке в 30 кг. Скорость трения составляла 1,0 м / мин. Для сравнения параллельно испытывалось на износ сформированы абразивные сегменты Cu + Sn + КВ 250/200 (образец №0), полученные стандартной технологией (методом порошковой металлургии).

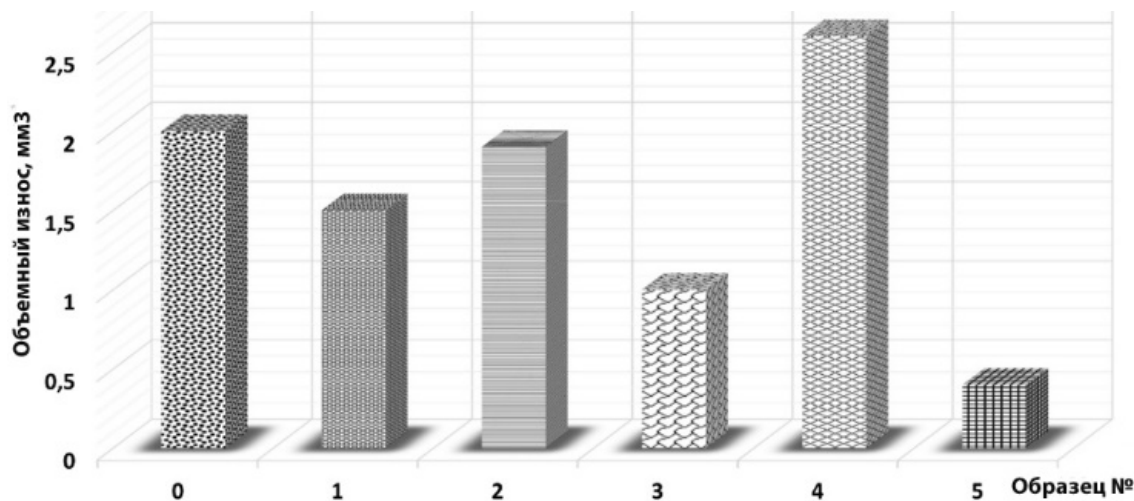


Рис. 14. Относительная абразивная износостойкость материалов

Как видно из приведенных данных (рис. 14), износостойкость наплавленных слоев коррелирует с твердостью. Наибольшую износостойкость проявление абразивный слой ПС-12НВК + КВ 315/250 металлизированный никелем, имеющий наибольшую твердость с сравниваемых абразивных слоев.

Наработанные результаты исследований могут быть использованы в промышленности для формирования инструментального слоя на корпусе инструмента (обдирочного, шлифовального), при изготовлении отрезных абразивных дисков, получать отдельные сегменты с абразивным композитом (проволочных пил), стоматологического абразивного инструмента, при изготовлении ручного инструмента (полотен, пил, абразивных нитей, шарошек и др.). Использование широкой номенклатуры связок с температурами плавления 800–1500 °С, может быть использовано при формировании армированного абразивного провода разных диаметров, концентрацией и ориентацией зерен КНБ.

Для уменьшения термической нагрузки на корпус инструмента и расширения границ использования шлифпорошков разных марок предложен способ нанесения на поверхность инструмента промежуточного слоя из материала, который является основой абразивного композита, что обеспечивает наличие металлургической связи с материалом корпуса и равномерное размещение зерен КНБ при нанесении следующих слоев, а так же позволяет формировать инструментальный композит на плоских поверхностях и телах вращения при изготовлении разных типов инструментов.

## Выводы

Разработан новый высокоэффективный процесс лазерного селективного спекания инструментальных композитов на основе кубического нитрида бора, технологические принципы его построения, оригинальные способы и устройства для радиального и осевого спекания рабочего слоя дисковых абразивных кругов, изготовлены их опытные образцы. Главными отличительными признаками разработки являются: высокая производительность процесса (50 – 100 мм<sup>2</sup>/мин), в 15 – 20 раз превышающая производительность применяемого в настоящее время (0.5 – 1 мм<sup>2</sup>/мин), низкая энергоемкость в сравнении термо-деформационным спеканием шихты, возможность применения в качестве связок широкой гаммы металлов, обладающих оптимальной твердостью, в зависимости от необходимых эксплуатационных свойств абразивного слоя, возможность полной автоматизации, исключение применения дорогостоящих и дефицитных жаропрочных инструментальных сталей и сплавов для изготовления пресс-форм и технологической оснастки.

Установлены диапазоны плотностей мощности лазерного излучения,  $W_p = (0.1...1.8) \times 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>, и продолжительности воздействия (0.2 – 1.2 с), величины деформирующего усилия на этапе охлаждения композита – (400 – 700 Н), температура спекания – (400 – 1300) °С.



Для лазерного селективного спекания целесообразно использовать зерна КНБ с покрытием *Ni, Cu* 70–130 % от массы зерна, которые в совокупности с защитным газом (аргон с расходом 5 – 14 л/мин), обеспечивают возможность применения связок с повышенными температурами плавления и получать за один проход более толстые слои композита.

Разработанный процесс позволяет в заданном порядке размещать зерна КНБ как на одно – так и многослойных рабочих поверхностях различных инструментов.

При использовании связок с температурой плавления менее 1000 °С, целесообразно использовать лазерное излучение с  $\lambda = 10,6$  мкм и шлифпорошки КНБ с металлизацией. При использовании связок с температурой плавления более 1000 °С, целесообразно использовать лазерное излучение с  $\lambda = 1,06$  мкм и шлифпорошки КНБ с металлизацией, термостойких модификаций. Спекания проводить в защитной среде (аргон, азот).

## References

1. Особенности применения режущих инструментов из поликристаллического кубического нитрида бора с защитным покрытием / С.А. Клименко, С. Ан. Клименко, А.С. Манохин, В.М. Береснев // Сверхтвердые материалы. – 2017. – №4. – С. 88–100.
2. Скороход В. В. Спекание порошковых материалов при электротермическом, плазменном и лазерном нагреве // Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. – К.: Наук. думка, 1998. – С. 228–248.
3. Судник, Л. В. Алмазосодержащие абразивные нанокompозиты / Л. В. Судник, П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко. – Минск : Беларус. навука, – 2012. – 319 с.
4. Райченко А.И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока. – М.: Металлургия, 1984. – 128. с.
5. Лазерное спекание алмазосодержащих инструментальных композитов. /Л.Ф. Головки, Омидвари Эхсан, Н.И. Анякин, Н.В. Новиков, А.А. Шепелев, В.Г. Сороченко. Проблемы трибологии. – 2008.– №2. С. 98–104.
6. Рагуля А.В. Селективное лазерное спекание. 1. Принципы. Континуальная модель. - Там же // Порошковая металлургия. – 1998. – №7/8. – С. 16–26.
7. Tolochko, N.K., et al.: Absorptivity measurement of freely located one component metal powders and its change during laser processing. Powder Metall. – 1998. – №7/8. – P. 89–94.
8. On the possibility of using laser technology for diamond tool manufacturing / V. S. Kovalenko, L. F. Golovko, N. V. Novikov et al. // J. of Eng. Manufacture. – 2004. – 218, Pt B. – P. 1029-1036.
9. Features of application of laser technology for a sintering diamond of composite materials / V. S. Kovalenko, L. F. Golovko, N. V. Novikov et al. // Intern. conf. on laser technologies in welding and materials processing. – Katsivelevi, Crimea, 21–28 May, Kiev, 2005. – P. 121–125.
10. Гончарук О.О. Влияние лазерного нагрева на прочность кубического нитрида бора при статическом нагружении / [О.О. Гончарук, О.Д. Каглык, Л.Ф. Головки] // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – №1/6(43). – С. 4–10.
11. Патент на корисну модель № 63067 Україна, МПК С23С 28/00. Спосіб виготовлення надтвердих абразивів з покриттям / О.О.Гончарук, Л.Ф. Головки, Скуратовский А.К., Новіков М.В., Сороченко В.Г., Шепелев А.О. (Україна). – u2011 02529; заявл. 03.03.2011; опубл. 26.09.2011, бюл. №18. – 4 с.
12. Порошки алмазные. Технические условия. – ГОСТ 9206-80. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 45с.
13. Патент на корисну модель № 63066 Україна, МПК В24Д 3/00. Спосіб виготовлення порошоків із синтетичних надтвердих матеріалів / О.О.Гончарук, Л.Ф. Головки, Скуратовский А.К., Новіков М.В., Сороченко В.Г., Шепелев А.О. (Україна). – u2011 02527; заявл. 03.03.2011; опубл. 26.09.2011, бюл. №18. – 4 с.
14. Kostyk K.A. The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels / [Alaa Fadhil I Idan, O. V. Akimov, L.F. Golovko, O.O. Goncharuk, K.A. Kostyk.] // Eastern European journal of enterprise technologies. – 2016. – T. 80 № 2/5. – С. 69–73.
15. Munir, Z.A., Quach, D.V., Ohyanagi, M.: Electric current activation of sintering: a review of the pulsed electric current sintering process. J. Am. Ceram. Soc. 2011. – T. 94, №1. – С. 1–19. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.04210>
16. Orru, R., Licheri, R., Locci, A.M., Cincotti, A., Cao, G.: Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering. Mater. Sci. Eng. – 2009. – 63(4–6). – С. 127–287. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2008.09.003>
17. Blochanevich, A.M., Bochko, A.M.: Laser cutting materials on basis of diamond and compact modification boron nitride. Powder Metall. –2004. – 3/4. – С. 47–53.
18. Idan Alaa, F.I., Golovko, L., Goncharuk, O., Kostyk, K.: The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels. Eastem-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65455>
19. Wąglowski, M.S., Blacha, S., Phillips, A.: Electron beam welding – techniques and trends – review. Vacuum. – 2016.– No. 130. – С. 72–92.
20. Rommela, D., Scherma, E, Kuttnerb, C., Glatzela, U.: Laser cladding of diamond tools: interfacial reactions of diamond and molten metal. Surf. Coat Technol. – 2016. – No.291, С. 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.suifcoat.2016.02.014>
21. Rabiey, M., Walter, C., Kuster, E, Stirnimann, J., Pude, E, Wegener, K.: Dressing of hybrid bond CBN wheels using short-pulse Fiber laser. Aust. J. Mech. Eng. – 2012.– No.58. – С. 7–8. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2011.166>
22. Huang, S.–F., Tsai, H.–L., Lin, S.–T.: Laser brazing of diamond grits using a cu-15Ti-10Sn brazing alloy. Mater. Trans. 43(10), 2604–2608 (2002). <https://doi.org/10.2320/matertrans.43.2604>
23. Aleshin, V.G.: Composition of surface layers of boron nitride particles according to X–ray photoelectron spectroscopy data / B.V. Aleshin, A.N. Sokolov, A.A. Shulzhenko // Powder Metall. – 1986.– No.12. С. 76–81.

24. Rubshtein, A.P., Trakhtenberg, I.S., Vykhodets, V.S., Kurennykh, T.E., Remnev, G.E.: Wearing of low- carbon steel which was exposed to a powerful ion beam in a flow of hard particles. Str. Technol. Coat. – 2010. No.61, C. 11–16.
25. Goncharuk, A. A.: The influence of laser radiation on the stability of cubic boron nitride. X International Scientific and Technical Web-Conference “Composite Materials”, (2017). Accessed: May 1, 2017. <http://htkm.kpi.ua/conferenc-ua-2017.html>
26. Bahman, A., Ali, Z.: Laser conditioning and structuring of grinding tools-a review. J. Adv. Manuf. 5(1), 35–49 (2017)
27. Yang, Z., Junchen, H.: 3D printing of diamond tools for dental ceramics processing. Adv. Eng. Mater. 20(3), 50–68 (2018). <https://doi.org/10.1002/adem201700747>
28. Sui, Y., Yang, E: Microstructure and wear resistance of laser-cladded Ni-based composite coatings on downhole tools. J. Mater. Process. Technol. 252, 217–224 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.028>

## Laser-assisted Manufacturing of CBN-contained grinding tools

Golovko Leonid, Goncharuk Olekii, Kaglyak Oleksii

**Abstract.** We report the results of the study of the effect of laser radiation with a wavelength of 1.06 microns and 10.6 of varying intensity on the grain CBN strength under static loading. The use of the above mentioned abrasive aggregates in combination with bonding materials with different melting temperatures in technological processes of laser-assisted manufacturing of grinding tools is discussed in this paper. There were also discussed special techniques to protect aggregates from overheating at grinding wheel's manufacturing as well as the quality and productivity of such technological processes. The opportunity to use laser sintering of abrasive layers on main bodies of polishing and cutting tools is discussed in detail. Moreover, the influence of direct and indirect laser heating on the properties of cubic boron nitride (CBN) and physical properties that take place on the boundary of CBN and tool main body. The critical value of the intensity of the laser radiation and the time of exposure at which CBN grains do not lose their original strength. It is shown that in order to reduce the thermal load on the grain CBN advisable to pre-applied metal coating, well reflecting the radiation and improve their wettability ligament. The results of modeling and experimental studies of the process thermal-sintering composites with CBN, defined exposure conditions under which high-quality working layer are formed, including on real instruments.

**Keywords:** laser sintering, super-hard materials, composites for tool manufacturing.

## Формування лазерним випромінюванням робочого шару абразивних інструментів на основі кубічного нітриду бору

Л. Ф. Головко, О. О. Гончарук, О. Д. Кагляк

**Анотація** Повідомляються результати вивчення впливу лазерного випромінювання з довжиною хвилі 1,06 і 10,6 мкм різної інтенсивності на міцність зерен кубічного нітриду бору при статичному навантаженні. Обговорюються питання використання розглянутих шліфпорошків в процесах лазерного формування інструментальних композитів на зв'язках з різною температурою плавлення. Розглянуто методи захисту шліфпорошків від перегріву в процесі формування абразивного шару. В роботі аналізуються проблеми підвищення якості таких інструментів і продуктивності їх виготовлення, розглядаються питання, що стосуються застосування технології лазерного спікання для виготовлення робочих шарів безпосередньо на корпусах інструментів, призначених як для шліфування, так і лезвийної обробки. Висвітлюються результати вивчення впливу безпосереднього і непрямого короткочасного лазерного нагріву на фізико-механічні властивості кубічного нітриду бору, фізико-хімічні процеси, що протікають на кордоні кристала КНБ зі зв'язкою, матеріалом корпусу інструменту. Визначено критичні значення інтенсивності лазерного випромінювання і часу його впливу, при яких зерна КНБ не втрачають своєї початкової міцності. Показано, що для зниження термічного навантаження, на зерна КНБ доцільно попередньо наносити металеві покриття, що підвищують їх змочуваність зв'язкою. Наведено результати моделювання та експериментальних досліджень процесу лазерного спікання робочих шарів абразивних інструментів на основі КНБ, визначені умови опромінення, при яких формуються абразивні шари, в тому числі і на реальних інструментах.

**Ключові слова:** лазерне випромінювання, спікання, кубічний нітрид бору, міцність при статичному навантаженні.

### References

1. Klimentenko, S.A. (2017), Osobennosti primeneniya rejuschih instrumentov iz polikristalllicheskogo kubicheskogo nitrida bora s zaschitnim pokritiem, no. 4, *Sverhtverdie materialy*, Kyiv, Ukraine
2. Skorohod, V.V. (1998), Spekanie poroshkovih materialov pri elektrotermicheskom plazmennom i lazernom nagreve, *Suchasne materialoznavstvo XXI storichchya*, Nauk. Dumka, Kyiv, Ukraine
3. Sudnik, L.V. (2012), *Almazosoderjaschie abrazivnie nanokompoziti*, Belarus. Navuka, Minsk, Belarus. ISBN 978-985-08-1425-8
4. Raichenko, A.I. (1984), *Osnovi processa spekaniya poroshkov propuskaniem elektricheskogo toka*, Metallurgiya, Moscow, Russia.
5. Golovko, L.F. (2008), Lazernoe spekanie almazosoderjaschih instrumentalnih kompozitov, No. 2, *Problemi tribologii*, Kyiv, Ukraine
6. Ragulya, A.V. (1998), Selektivnoe lazernoe spekanie. 1.Principi. Kontinualnaya model, No. 7/8, *Poroshkovaya metallurgiya*, Kyiv, Ukraine



7. Tolochko, N.K. and dr. (1998), Absorptivity measurement of freely located one component metal powders and its change during laser processing. *Powder Metall.* no.7/8, pp. 89–94.
8. Kovalenko, V.S. (2004), On the possibility of using laser technology for diamond tool manufacturing, *J. of Eng. Manufacture*, DOI: <https://doi.org/10.1243/0954405041486136>
9. Kovalenko, V.S. (2005), Features of application of laser technology for a sintering diamond of composite materials, *Intern. conf. on laser technologies in welding and materials process*, Kyiv, Ukraine.
10. Goncharuk, O.O. (2010), Vliyanie lazernogo nagreva na prochnost kubicheskogo nitrída bora pri staticheskom nagrujenii, №1/6(43), *Shidno-Evropeiskii jurnal peredovih tehnologii*, Kharkov, Ukraine.
11. Goncharuk, O.O. (2011), National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, *Sposib vivotovlennya nadtverdih abraziviv z pokrittyam*, Ukraine, Pat. 63067.
12. GOST 9206-80 (1989), Poroshki almaznyye. Tekhnicheskiye usloviya, *Izdatel'stvo standartov*, Moscow, Russia.
13. Goncharuk, O.O. (2011), National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, *Sposib vivotovlennya poroshkiv iz sintetichnih nadtverdih materialiv*, Ukraine, Pat. 63066.
14. Kostyk, K.A. (2016), *The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels*, № 2/5(80), Eastern European journal of enterprise technologies, Kharkov, Ukraine.
15. Munir, Z.A., Quach, D.V., Ohyanagi, M. (2011), Electric current activation of sintering: a review of the pulsed electric current sintering process. *J. Am. Ceram. Soc.* vol. 1, no. 94, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.04210>
16. Orru, R. (2009), Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering, *Mater. Sci. Eng.* 63(4–6), pp. 127–287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2008.09.003>
17. Blochanevich, A.M. (2004), Laser cutting materials on basis of diamond and compact modification boron nitride, no. 3/4, *Powder Metall*, Kyiv, Ukraine.
18. Idan Alaa, F.I. (2016), The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels, no. 2, vol.5 (80), *Eastem-European Journal of Enterprise Technologies*, Kharkov, Ukraine, doi:10.15587/1729-4061.2016.65455
19. Wqglowski, M.S. (2016), Electron beam welding – techniques and trends – review, vol. 130, *Vacuum*, Kolobrzeg Poland DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.05.004>
20. Rommel, D. (2016), Laser cladding of diamond tools: interfacial reactions of diamond and molten metal, vol. 291, *Surf. Coat Technol*, Bayreuth, Germany. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.02.014>
21. Rabiye, M. (2012), Dressing of hybrid bond CBN wheels using short-pulse Fiber laser. vol. 58, *J. Mech. Eng.* DOI: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2011.166>
22. Huang, S.-F. (2002), Laser brazing of diamond grits using a cu-15Ti-10Sn brazing alloy, vol. 43, *Materials transactions*. DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.43.2604>
23. Aleshin, V.G. (1986), *Composition of surface layers of boron nitride particles according to X-ray photoelectron spectroscopy data*, 12, Powder Metall.
24. Rubshtein, A.P. (2010), Wearing of low- carbon steel which was exposed to a powerful ion beam in a flow of hard particles. *Str. Technol. Coat* 61.
25. Goncharuk, A.A. (2017), The influence of laser radiation on the stability of cubic boron nitride. *X International Scientific and Technical Web-Conference “Composite Materials”*, DOI: <http://htkm.kpi.ua/conferenc-ua-2017>.
26. Bahman, A. (2017), Laser conditioning and structuring of grinding tools-a review, *J. Adv. Manuf.* 5 (1), DOI: <https://doi.org/10.1007/s40436-016-0167-0>
27. Yang, Z. (2018), 3D printing of diamond tools for dental ceramics processing, *Adv. Eng. Mater.* 20(3). <https://doi.org/10.1002/adem201700747>
28. Sui, Y. (2018), Microstructure and wear resistance of laser-cladded Ni-based composite coatings on downhole tools. *J. Mater. Process. Technol.* DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.028>