

УДК 621.762

# ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА НА ПРОЧНОСТЬ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Л.Ф. Головко

Доктор технических наук, профессор\*  
Контактный тел.: (044) 454-96-06  
E-mail: Leongolovko@gmail.com

А.А. Гончарук

Ассистент\*  
Контактный тел.: 096-749-43-26  
E-mail: goncharuk.alex@gmail.com

А.Д. Кагляк

Ассистент\*  
Контактный тел.: 068-322-99-67  
E-mail: Kaglyak\_O@meta.ua

\*Кафедра лазерной техники и физико-технических технологий

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»  
пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

*Повідомляються результати вивчення впливу лазерного нагрівання на міцність кубічного нітриду бору при статичному навантаженні. Обговорюються питання використання лазерного випромінювання для виготовлення інструментів на основі кубічного нітриду бору*

*Ключові слова: лазерне випромінювання, кубічний нітрид бору, міцність*

*Сообщаются результаты изучения влияния лазерного нагрева на прочность кубического нитрида бора при статическом нагружении. Обсуждаются вопросы использования лазерного излучения для изготовления инструментов на основе кубического нитрида бора*

*Ключевые слова: лазерное излучение, кубический нитрид бора, прочность*

*The influence of laser heating on the strength properties of cubic boron nitride at static loading are investigated in this paper. The applicability of laser irradiation for manufacturing of cutting tools based on cubic boron nitride is discussed*

*Keywords: laser irradiation, cubic boron nitride, strength*

## 1. Введение

Расширение использования новых труднообрабатываемых конструкционных материалов требует создания новых высокоэффективных инструментов на основе кубического нитрида бора (КНБ). Кристаллы кубического нитрида бора имеют теплостойкость до 800°C. При температурах, превышающих это значение, протекают процессы окисления, которые приводят к потере прочности. Эти кристаллы получают путем синтеза гексагонального нитрида бора при наличии растворителя в специальных контейнерах на гидравлических прессах, обеспечивающих требуемое давление 300-980 МН/м<sup>2</sup> и температуру, около 2000°C. В отличие от алмаза, кубический нитрид бора нейтрален

к железу и не вступает с ним в химическое взаимодействие. Высокая твердость, термостойкость и нейтральность к железу, сделали кубический нитрид бора весьма перспективным сверхтвердым материалом для обработки различных железосодержащих сплавов (легированных сталей и др.) обеспечивающим резкое снижение адгезионного и диффузионного износа инструмента (по сравнению с алмазным).

Для изготовления инструмента на основе КНБ применяются различные технологии, отличающиеся методом формирования рабочего инструментального слоя и способом закрепления зерен КНБ. Для их закрепления и удерживания применяют различные связки. Инструментальные композиты получают методом спекания связки и зерен КНБ, гальваническим

осаждением связки на поверхность инструмента с размещенными на ней зернами КНБ, плазменным напылением и др. Каждый из перечисленных способов имеет свои преимущества и недостатки, области целесообразного применения.

Главным направлением в современной технологии спекания порошковых материалов является использование высокоскоростного нагрева, который позволяет оптимизировать процесс спекания и получать материалы с высокой плотностью и мелкозернистой структурой [2]. В связи с этим, появился ряд неизотермических методов спекания. Среди них следует выделить метод спекания металлических материалов прямым пропусканием электрического тока [3] и с применением лазерного нагрева [1,4,5,6].

Как источник нагрева, лазерное излучение имеет ряд значительных преимуществ: оно позволяет за счет высокой скорости бесконтактного ввода энергии в материал и ее строгой дозированности осуществлять в широком диапазоне температур сверхскоростной нагрев локальных областей материалов, формировать высокодисперсные структуры. Это позволяет использовать лазерный нагрев для спекания тонких слоев металлических и композиционных материалов.

Данная работа посвящена изучению возможности применения лазерного излучения для изготовления инструментов на основе КНБ. Исследования проводились с целью установления основных закономерностей взаимодействия лазерного излучения с КНБ различных марок и зернистостей, влияния лазерного облучения на их прочностные характеристики.

лось на специальном технологическом комплексе, в состав которого входил мощный электроразрядный CO<sub>2</sub> лазер "Комета-2", устройство для транспортирования, фокусирования и контроля параметров излучения, пятикоординатный стол с системой программного управления.

Лазерное излучение фокусировалось сферической линзой изготовленной из KCl с фокусным расстоянием F = 200 мм. Общий вид комплекса представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид лазерного технологического комплекса на базе мощного CO<sub>2</sub> лазера "КОМЕТА-2"

На процесс лазерного спекания оказывают влияние ряд факторов, связанных с лазерным пучком, условиями облучения, свойствами КНБ и связки. Схема причинно-следственных связей между основными факторами и параметрами процесса лазерного спекания композитов приведена на рис. 2.

## 2. Экспериментальное оборудование и методика проведения исследований.

Одной из главных задач исследования является определение максимальных значений температур скоростного лазерного нагрева различных шлифпорошков кубического нитрида бора (КНБ) и соответствующих им условий облучения, при которых не наблюдается снижения их прочностных и режущих свойств, исследование основных свойств КНБ, влияющих на его применение для изготовления режущего инструмента.

Лазерное облучение проводи-

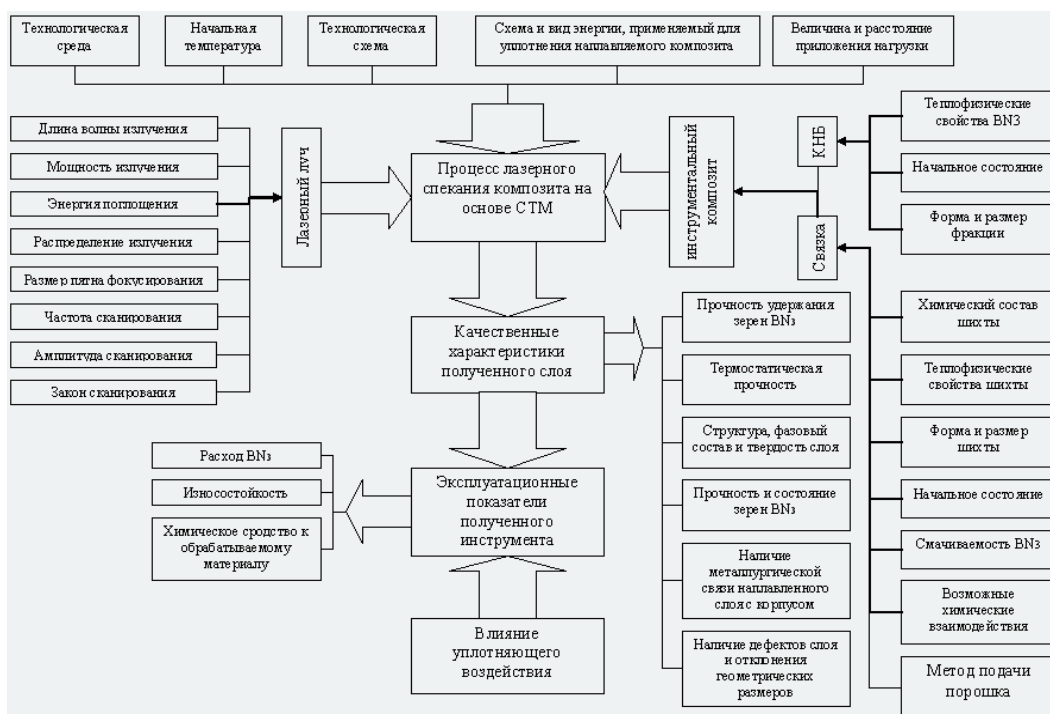


Рис. 2. Основные факторы и параметры процесса лазерного спекания композитов из СТМ и их причинно-следственные связи

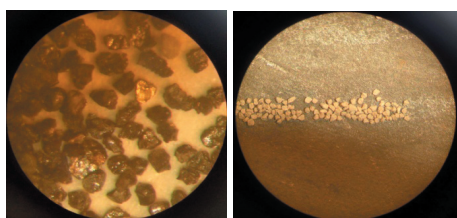
Для проведения экспериментальных исследований процесса лазерного спекания композитов на основе КНБ необходимо получить данные, отражающие связь характеристик лазерного нагрева конкретных материалов с основными технологическими параметрами обработки: мощностью излучения (Р,Вт) и ее распределением по облучаемой поверхности (Р(х,у), Вт/см<sup>2</sup>), диаметром пятна фокусирования (d<sub>п</sub> = 2гг, мм), скоростью относительного движения лазерного луча (V, м/мин), частотой (f, Гц) и амплитудой (А, мм) сканирования при использовании сканирующего пучка.

Структурные и фазовые изменения в исследуемых системах однозначно определяются температурным режимом лазерного нагрева и последующего охлаждения. Характеристики температурного поля (уровень температур, их распределение по нагреваемому объему, скорости нагрева и охлаждения) определяются рядом факторов, связанных с источником нагрева, характеристиками обрабатываемого материала, условиями их взаимодействия.

Для исследования влияния лазерного нагрева на кубический нитрид бора были выбраны шлифовальные порошки четырех марок, исходная прочность при статическом нагружении которых представлена в табл.1. Определение показателя статической прочности кубонитовых шлифпорошков проводили по стандартной методике на приборе модели ДА-2. Сущность метода - определение значений статической нагрузки, разрушающей кубонитовые зерна, помещенные между двумя параллельными пластинами. Исходные порошки представлены на рис. 3.

Таблица 1

Шлифпорошок кубического нитрида бора	Прочность зерен, Н	
	Данные измерений	Данные измерений производителей
CBN 100(D1)	13,0	-
KB 250/200. 14.08.07.	12,1	13,2
КНБ KB 250/200 (п.1031)	9,4	12,6
KB 250/200. Партия 175	8,5	-
КР 200/160	8	10,5



а) б)  
Рис. 3. Исходные микропорошки:  
а – CBN 100 (D1) 250/200; б – KB 250/200

Изучение влияния лазерного нагрева на свойства зерен КНБ решалось прямым облучением, при котором зерна шлифпорошка отбирались по 100 шт. в партии, размещались в ряд на графитовой подложке и подвергались воздействию непрерывного мощного СО<sub>2</sub> лазера, с длиной волны λ=10,6 мкм. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 4, 5.

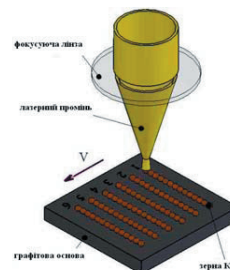


Рис. 4. Схема прямого облучения КНБ

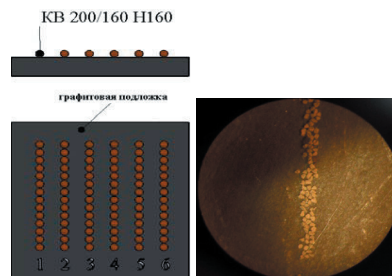


Рис. 5. Схема расположения зерен КНБ на графитовой подложке

Лазерное облучение зерен КНБ осуществлялось при следующих параметрах обработки: диаметр пятна фокусирования ( d = 2 – 7 мм), скорость перемещения заготовки относительно луча ( V = 0.2 – 2 м/мин), мощность лазерного излучения оставалась неизменной Р=700 Вт.

Исследования облученных и необлученных зерен кубического нитрида бора проводили с помощью растровой электронной микроскопии, локального и интегрального рентгеноспектрального элементного анализа на сканирующем электронном микроскопе ZEISS EVO 50 XVP производства ZEISS, укомплектованного энергодисперсным анализатором рентгеновских спектров INSA Pente FETx3 HKL CHANNEL-5 для дифракции электронов производства фирмы OXFORD.

Определение показателя статической прочности кубонитовых шлифпорошков проводили по стандартной методике на приборе модели ДА-2.

### 3. Результаты исследований

На рис. 6 – 10 представлены электронные изображения шлифпорошков, а также выполнен анализ всех элементов, результаты которых приведены в табл. 2 – 5 (результаты в весовых %).

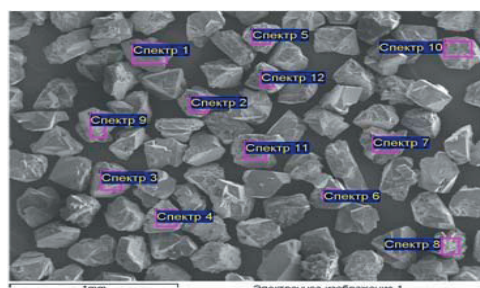


Рис. 6. Электронное изображение исходного шлифпорошка кубического нитрида бора KB 250/200

**Таблица 2**

Спектральный анализ исходного шлифпорошка кубического нитрида бора KB 250/200

Параметры обработки. Выполнен анализ всех элементов (нормализован)						
Спектр	Встат.	B	N	Mg	Cu	Итог
Спектр 1	Да	46.80	53.20			100.00
Спектр 2	Да	45.10	54.90			100.00
Спектр 3	Да	47.18	52.82			100.00
Спектр 4	Да	47.15	52.85			100.00
Спектр 5	Да	46.94	53.06			100.00
Спектр 6	Да	48.57	51.43			100.00
Спектр 7	Да	46.75	53.04	0.21		100.00
Спектр 8	Да	45.70	54.30			100.00
Спектр 9	Да	46.29	53.71			100.00
Спектр 10	Да	46.13	53.87			100.00
Спектр 11	Да	49.16	50.84			100.00
Спектр 12	Да	47.25	52.49		0.26	100.00
Макс.		49.16	54.90	0.21	0.26	
Мин.		45.10	50.84	0.21	0.26	

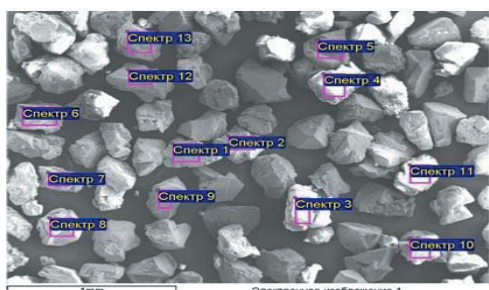


Рис. 7. Электронное изображение шлифпорошка кубического нитрида бора KB 250/200, подвергнутого лазерному излучению со скоростью 0,8 м/мин (время облучения 0,53 с)

**Таблица 3**

Спектральный анализ кубического нитрида бора KB 250/200, подвергнутого лазерному излучению со скоростью 0,8 м/мин (время облучения 0,53 с)

Параметры обработки. Выполнен анализ всех элементов (нормализован)						
Спектр	Встат.	B	N	O	Mg	Итог
Спектр 1	Да	43.44	44.70	11.29	0.57	100.00
Спектр 2	Да	43.77	53.54	2.69		100.00
Спектр 3	Да	45.03	52.89	2.09		100.00
Спектр 4	Да	42.94	57.06			100.00
Спектр 5	Да	44.79	47.73	7.47		100.00
Спектр 6	Да	38.92	30.80	29.90	0.38	100.00
Спектр 7	Да	46.46	48.73	4.81		100.00
Спектр 8	Да	41.79	49.03	9.18		100.00
Спектр 9	Да	45.08	54.92			100.00
Спектр 10	Да	47.50	49.15	3.35		100.00
Спектр 11	Да	44.46	55.54			100.00
Спектр 12	Да	43.32	45.65	10.74	0.28	100.00
Спектр 13	Да	40.20	42.26	17.31	0.23	100.00
Макс.		47.50	57.06	29.90	0.57	
Мин.		38.92	30.80	2.09	0.23	

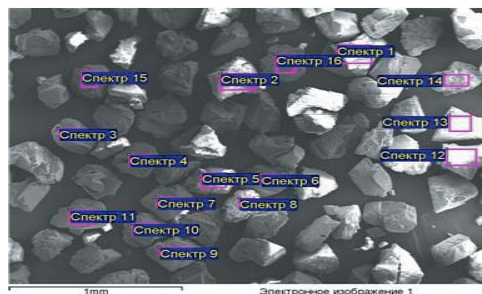


Рис. 8. Электронное изображение шлифпорошка кубического нитрида бора KB 250/200, подвергнутого лазерному излучению со скоростью 1,4 м/мин (время облучения 0,30 с)

**Таблица 4**

Спектральный анализ кубического нитрида бора KB 250/200, подвергнутого лазерному излучению со скоростью 1,4 м/мин (время облучения 0,30 с)

Параметры обработки. Выполнен анализ всех элементов (нормализован)								
Спектр	Встат.	B	C	N	O	Mg	Cl	Итог
Спектр 1	Да	42.07		54.89	3.04			100.00
Спектр 2	Да	46.61		53.39				100.00
Спектр 3	Да	42.00		41.30	16.33	0.37		100.00
Спектр 4	Да	41.50		47.76	10.38		0.36	100.00
Спектр 5	Да	42.50		39.94	17.14	0.41		100.00
Спектр 6	Да	44.70		39.88	15.09	0.33		100.00
Спектр 7	Да	42.45		44.48	12.71	0.37		100.00
Спектр 8	Да	45.19		49.76	4.73	0.33		100.00
Спектр 9	Да	45.21		54.79				100.00
Спектр 10	Да	46.30		44.52	8.70	0.47		100.00
Спектр 11	Да		14.14	53.26	32.60			100.00
Спектр 12	Да	32.80		22.72	40.73	3.75		100.00
Спектр 13	Да			22.72	47.92	4.36		100.00
Спектр 14	Да	45.02		49.06	5.59	0.33		100.00
Спектр 15	Да	41.74		46.22	11.74	0.29		100.00
Спектр 16	Да	41.43		35.59	22.99			100.00
Макс.		46.61	14.14	54.89	47.92	4.36	0.36	
Мин.		32.80	14.14	22.72	3.04	0.29	0.36	

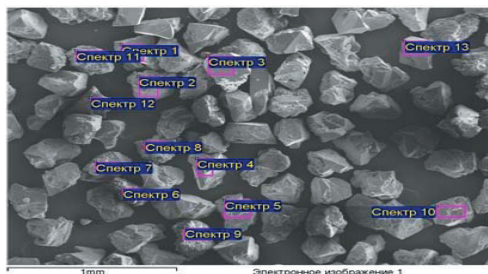


Рис. 9. Электронное изображение шлифпорошка кубического нитрида бора KV 250/200 подвергнутого лазерному излучению со скоростью 2,0 м/мин (время облучения 0,21 с)

времени воздействия  $\tau = 0,53$  с, количество дефектных зерен кубического нитрида бора, равное сумме зерен с трещинами и зерен белого цвета равно 17 (см. табл. 6), что составляет примерно 27 %, при  $v = 1,4$  м/мин – 20%. При скорости перемещения лазерного луча  $v = 2,0$  м/мин видимых в поле зрения микроскопа зерен с трещинами и зерен белого цвета не обнаружено.

Анализ результатов элементного состава, которые приведены в табл. 2-5 показывает, что меньшем диаметре фокусирования и низкой скорости перемещения наблюдается интенсивное выделение на поверхности зерен элементов ростовой системы синтеза кубического нитрида бора (Mg), а также

Таблица 5

Спектральный анализ кубического нитрида бора KV 250/200, подвергнутого лазерному излучению со скоростью 2,0 м/мин (время облучения 0,21 с)

Параметры обработки. Выполнен анализ всех элементов (нормализован)											
Спектр	Встат.	B	N	O	Na	Mg	Cl	Ca	Fe	Cu	Итог
Спектр 1	Да	44.50	50.63	4.43		0.16			0.27		100.00
Спектр 2	Да	44.46	49.08	5.63	0.27	0.40		0.16			100.00
Спектр 3	Да		42.91	45.56	7.44	2.90	1.19				100.00
Спектр 4	Да	45.90	54.10								100.00
Спектр 5	Да		63.67	29.58	3.80		2.94				100.00
Спектр 6	Да	43.90	49.10	6.55		0.45					100.00
Спектр 7	Да	43.40	51.30	4.98	0.18	0.13					100.00
Спектр 8	Да	46.40	53.11			0.49					100.00
Спектр 9	Да		36.50	36.99	13.75	1.01	11.0			0.76	100.00
Спектр 10	Да	48.58	51.42								100.00
Спектр 11	Да	45.97	53.86			0.16					100.00
Спектр 12	Да	47.46	49.28	3.27							100.00
Спектр 13	Да	51.47	48.53								100.00
Макс.		51.47	63.67	45.56	13.75	2.90	11.0	0.16	0.27	0.76	
Мин.		43.40	36.50	3.27	0.18	0.13	1.19	0.16	0.27	0.76	

В табл. 6 приведены результаты электронной микроскопии зерен кубического нитрида бора KV 250/200 до и после лазерного облучения. Анализ полученных результатов показывает, что в результате лазерного нагрева на некоторых зернах наблюдается образование трещин и образование зерен белого цвета. При этом количество зерен с видимыми в поле зрения микроскопа трещинами и образовавшихся зерен кубического нитрида бора белого цвета больше при таких режимах, при которых зерна относительно длительное время подвергаются воздействию лазерного нагрева (при более низкой скорости перемещения). Так при скорости перемещения лазерного луча  $v = 0,8$  м/мин, что соответствует наибольшему

нарастания интенсивности лазерного нагрева наблюдается выгорание продуктов финишной очистки и протекает процесс интенсивного окисления зерен кубического нитрида бора с аллотропическим переходом кубической решетки в гексагональную.

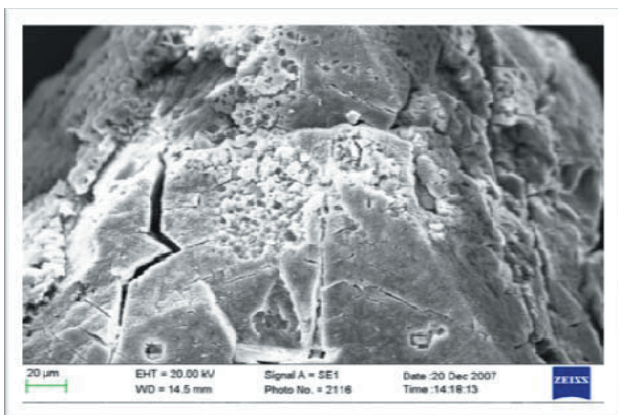
Перед измерением прочности из общей массы шлифпорошков кубического нитрида бора, которые были подвергнуты лазерному воздействию, отбирали 70-80 зерен белого цвета и столько же черного цвета.

Анализ результатов измерения прочности шлифпорошков кубического нитрида бора при статическом нагружении показал, что шлифпорошки марок CBN 100 (D1) 250/200 и KV 250/200 (черного цвета), которые имеют исходную прочность 13,0 Н и 12,1 Н, соответственно, при лазерном нагревании со скоростью перемещения лазерного луча от 1,0 до 1,5 м/мин при плотности мощности  $W_p = 1,82 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup> практически не теряют прочность зерен при статическом нагружении. Наличие же зерен кубического нитрида бора белого цвета после лазерного воздействия, у которых показатель прочности на указанных режимах равен 2,6 Н, что примерно в 5 – 6 раз ниже, чем аналогичный показатель у исходных шлифпорошков.

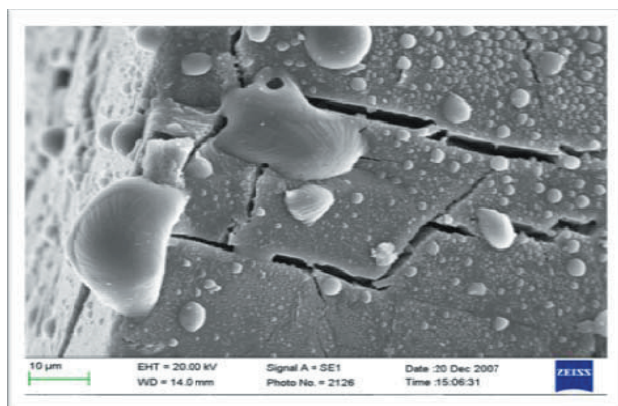
Механизм воздействия лазерного излучения на прочностные характеристики шлифпорошков кубического нитрида бора представляется следующим. Шлифпорошки кубического нитрида бора, полученные в результате финишной очистки продукта синтеза, пребывают в напряженном состоянии. Под действием лазерного нагрева на некоторых зернах образуются трещины (рис. 10), часть зерен приобретает белый цвет. По нашему мнению, причина указанного явления – растягивающие напряжения, возникающие в зернах при нагревании, обусловленные различием объемных коэффициентов термического расширения ростовой системы BN – металл.

Таблица 6

Режим лазерного облучения зерен	Количество зерен в поле зрения микроскопа	Количество зерен в поле зрения микроскопа с трещинами	Количество зерен в поле зрения микроскопа белого цвета	Количество зерен в поле зрения микроскопа черного цвета
Необлученный исходный порошок	70	-	-	-
Порошок подвергнутый лазерному нагреванию: мощность излучения $P=700$ Вт; плотность мощности $W_p=1,82 \cdot 10^3$ Вт/см <sup>2</sup> ; диаметр пятна $d_0=7$ мм; скорость перемещения лазерного луча $v=0,8$ м/мин; 1,4 м/мин; 2,0 м/мин.				
$v=0,8$ м/мин	64	7	10	54
$v=1,4$ м/мин	60	5	7	53
$v=2,0$ м/мин	63	-	-	63



а)



б)

Рис. 10. Вид образовавшейся трещины с вышедшим на поверхность металлом растворителем KB 250/200 п. 1031 скорость 1,4 м/мин, диаметр пятна фокусирования 7 мм: а – белое зерно; б – черное зерно

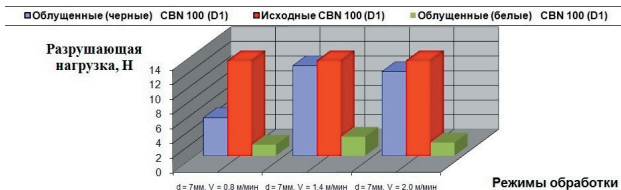


Рис. 11. Влияние скорости перемещения луча лазера на прочность зерен кубического нитрида бора марки CBN 100 (D1) при статическом нагружении

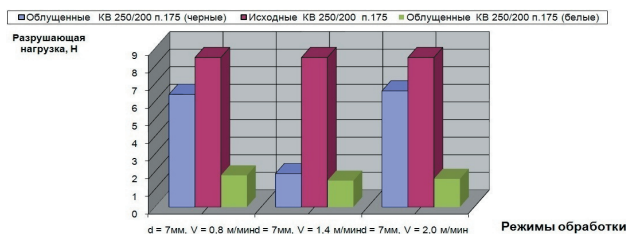


Рис. 12. Влияние скорости перемещения луча лазера на прочность зерен кубического нитрида бора марки KB 250/200 при статическом нагружении

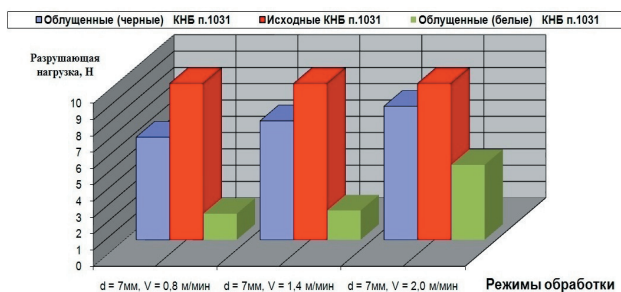


Рис. 13. Влияние скорости перемещения луча лазера на прочность зерен кубического нитрида бора марки KNB 250/200 (п. 1031) при статическом нагружении

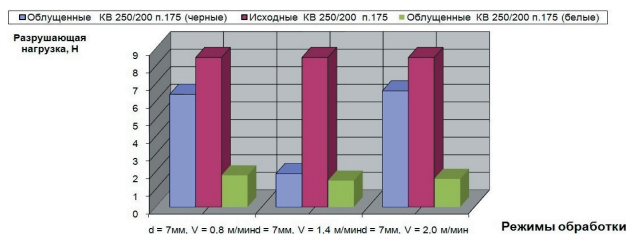


Рис. 14. Влияние скорости перемещения луча лазера на прочность зерен кубического нитрида бора марки KB 250/200 (Партия 175) при статическом нагружении

Исследование процесса взаимодействия лазерного излучения мощного  $CO_2$  лазера (длина волны 10,6 мкм) с зернами КНБ при непосредственном облучении позволило установить следующее:

- зерна КНБ имеют высокую поглощательную способность (75-80%) при действии лазерного излучения с  $\lambda=10,6$  мкм;
- скоростной лазерный нагрев при разных условиях облучения (мощность  $P=700$ Вт, диаметр пятна фокусирования  $d=7$  мм, скорость относительного движения  $V=0,8; 1,4; 2$  м/мин) сопровождается существенными изменениями состояния зерен КНБ.

При нагревании порошков KB 250/200 до температур 1000-1200°C в промежутке времени 0,3-0,5 с в его общей массе 70-80% составляли зерна исходного черного цвета, которые не имели заметных внешних изменений. 15-20% зерен от общего количества составляли зерна черного цвета с микротрещинами. 5-10% - составляли зерна исходной формы белого цвета, количество которых возрастало с увеличением времени облучения. При времени облучения 0,3 с. в общей массе зерен появлялось небольшое количество бесцветных зерен КНБ, которые имели исходную форму и отличались прозрачностью.

Зерна КНБ без изменений имели прочность, которая практически не отличалась от исходной. Черные зерна с трещинами при статической нагрузке имели значительно меньшую прочность. Наименьшую (в 5-6 раз) прочность имели зерна белого цвета, которые хрупко разрушались на мелкие частички практически сразу при контакте с индентором. Наибольшую прочность имели бесцветные прозрачные зерна. Увеличение скорости облучения при постоянной плотности мощности (температуре 1200°C) до 2 м/мин (время облучения 2 с) не приводит к внешним изменениям, в том числе и прочности сравнительно с исходной.

---

#### 4. Заключение

---

Таким образом, главными результатом выполненных исследований влияния лазерного облучения на состояние и физические свойства порошков кубического нитрида бора можно считать следующее.

Определены оптимальные энергетические параметры концентрированного лазерного облучения порошков КНБ {плотность мощности  $(1,6-2,0) \times 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>, время действия 0,2-0,3 с}, что обеспечивают температурный интервал их нагревания в диапазоне 1000-1500 °С, которое не приводит к отрицательному термическому разрушительному влиянию на зерна КНБ.

Это позволяет с принципиально высокой производительностью и низкой себестоимостью процесса формировать кубонитосодержащие композиты для разнообразной номенклатуры инструментов с точки зрения формы, размеров и свойств связок; создает предпосылки для лазерной селективной сортировки и лазерного модифицирования порошков КНБ.

---

#### Литература

1. А.М. Блощаневич, А.М. Бочко и др. Лазерная резка материалов на основе алмаза и плотных модификаций нитрида бора. – Порошковая металлургия. – 2004. – №3/4 – С.47-53.
2. В.В. Скороход. Спекание порошковых материалов при электротермическом, плазменном и лазерном нагреве. – 1998. – С. 228-248.
3. Райченко А.И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока. -М.: Металлургия, - 1984. – С.128.
4. Н.К. Толочко, Ю.В. Хлорков и др. Измерение поглощательной способности свободно насыпанных однокомпонентных металлических порошков и ее изменение в процессе лазерной обработки. - Порошковая металлургия. -1997. - № 7/8. -С. 89-94.
5. Рагуля А.В. Селективное лазерное спекание. 1. Принципы. Континуальная модель. - Там же. - 1998.
6. Коваленко В.С., Головки Л.Ф., Черненко В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. - К.: Техника. - 1991. – С.128.