

УДК 621.762 : 620.22-419 : 669.25

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-1-64-75

## Разработка нового поколения режущего инструмента из сверхтвердых материалов с наномодифицированной связкой для обработки стали и чугуна

© 2017 г. П.А. Логинов, Д.А. Сидоренко, Е.А. Левашов, В.А. Андреев

Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва  
ЗАО «Кермет», г. Москва

Статья поступила в редакцию 19.09.16 г., доработана 21.11.16 г., подписана в печать 23.11.16 г.

Показана возможность использования связок типа Next100, легированных никелем и модифицированных наночастицами WC, ZrO<sub>2</sub> и hBN, для изготовления режущего инструмента на основе сверхтвердых материалов, предназначенного для обработки стали и чугуна. Установлено, что легирование связки никелем позволяет увеличить ее ударную вязкость в 2,5 раза и существенно улучшить стойкость сегментов инструмента при эксплуатации. Благодаря введению в связку наночастиц WC, ZrO<sub>2</sub> и hBN обеспечивается повышение ее прочности на 100–150 МПа и твердости на 5–7 HRB. В присутствии наночастиц WC возрастает адгезия кубического нитрида бора к связке. Определено оптимальное соотношение монокристаллов алмаза и кубического нитрида бора в рабочем слое, при котором достигаются максимальные служебные характеристики инструмента, – 75 : 25. Выявлены формирование нанокластеров аморфного бора на границе раздела кубического нитрида бора и связки и растворение небольшого количества азота в компонентах связки при горячем прессовании.

**Ключевые слова:** алмазный инструмент, режущий инструмент, сверхтвердые материалы, наночастицы, механические свойства, композиционный материал.

**Логинов П.А.** – канд. техн. наук, мл. науч. сотр. Научно-учебного центра (НУЦ) СВС МИСиС–ИСМАН (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). Тел.: (499) 237-53-36. E-mail: pavel.loginov.misis@list.ru.

**Сидоренко Д.А.** – канд. техн. наук, науч. сотр. НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН. Тел.: (495) 638-46-42. E-mail: dsidorenko@inbox.ru.

**Левашов Е.А.** – докт. техн. наук, проф., акад. РАЕН, зав. кафедрой порошковой металлургии и функциональных покрытий НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4), директор НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН. Тел.: (495) 638-45-00. E-mail: levashov@shs.misis.ru.

**Андреев В.А.** – канд. физ.-мат. наук, ген. директор ЗАО «Кермет» (109316, г. Москва, Остаповский пр-д, 13). Тел.: (495) 662-54-54. E-mail: vandreev@kermet-m.ru.

**Для цитирования:** Логинов П.А., Сидоренко Д.А., Левашов Е.А., Андреев В.А. Разработка нового поколения режущего инструмента из сверхтвердых материалов с наномодифицированной связкой для обработки стали и чугуна // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2017. No. 1. С. 64–75.  
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-1-64-75.

*Loginov P.A., Sidorenko D.A., Levashov E.A., Andreev V.A.*

### **Development of next generation diamond tools based on superhard materials with nanomodified binder for steel and cast iron machining**

The paper demonstrates the possibility of using Next100 type binders alloyed with nickel and modified with WC, ZrO<sub>2</sub> and hBN nanoparticles for the manufacture of cutting tools based on superhard materials intended for steel and cast iron machining. It was found that nickel alloying of the binder makes it possible to increase its impact strength by 2,5 times and significantly improve the life of tool segments while in operation. Introduction of WC, ZrO<sub>2</sub> and hBN nanoparticles into the binder increases its strength by 100–150 MPa and hardness by 5–7 HRB. In the presence of WC nanoparticles, the adhesion of cubic boron nitride to the binder increases. The optimal ratio of diamond to CBN grains in the coating is determined for better tool performance – 75 : 25. The paper reveals the formation of amorphous boron nanoclusters at the at CBN-binder interface, and dissolution of a small amount of nitrogen in the binder components during hot pressing.

**Keywords:** diamond impregnated tool, cutting tool, superhard materials, nanoparticles, mechanical properties, composite material.

**Loginov P.A.** – Cand. Sci. (Tech.), junior researcher of Scientific-educational Centre of SHS of MISIS–ISMAN (119049, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: pavel.loginov.misis@list.ru.

**Sidorenko D.A.** – Cand. Sci. (Tech.), researcher of Scientific-educational Centre SHS MISIS–ISMAN. E-mail: dsidorenko@inbox.ru.

**Levashov E.A.** – Dr. Sci. (Tech.), prof., acad. of Russian Academy of Natural Science, head of the Department of powder metallurgy and functional coatings of National University of Science and Technology «MISIS» (119049, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4), head of Scientific-educational Centre of SHS MISIS–ISMAN. E-mail: levashov@shs.misis.ru.

**Andreev V.A.** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), executive general manager of CJSC «Kermet» (109316, Russia, Moscow, Ostapovskii proezd, 13). E-mail: vandreev@kermet-m.ru.

**Citation:** Loginov P.A., Sidorenko D.A., Levashov E.A., Andreev V.A. Razrabotka novogo pokoleniya rezhushchego instrumenta iz sverkhтвердых materialov s nanomodifitsirovannoi svyazkoi dlya obrabotki stali i chuguna. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2017. No. 1. P. 64–75. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-1-64-75.

## Введение

В ряде задач по утилизации крупных металлических конструкций необходимо предварительно разрезать их на фрагменты, пригодные для дальнейшей транспортировки. Традиционно для таких работ применяются газовая, электродуговая или плазменная резка. Неудобство этих способов связано, прежде всего, с необходимостью присутствия оператора непосредственно в зоне высокотемпературного воздействия на металлоконструкцию. Альтернативным методом демонтажа крупных стальных конструкций является резка алмазным инструментом — канатными пилами и отрезными сегментными кругами (ОСК) [1]. Такой класс инструментов характеризуется простотой сборки машины и инструмента, возможностью удаленного управления и автоматизации процесса. В ходе резки алмазным инструментом не нарушаются структура и химический состав поверхности резания.

При производстве режущего инструмента из сверхтвердых материалов (СТМ) в основном применяются металлические связки [2]. По способу изготовления они делятся на гальванические и спеченные (горячепрессованные). В инструментах со связками, нанесенными гальваническим методом, алмазы располагаются в одном слое [3–6], из-за чего такой инструмент демонстрирует высокую производительность на начальном этапе работы, но быстро утрачивает режущую способность. Инструмент со спеченным (или горячепрессованным) рабочим слоем характеризуется более высокой продолжительностью работы и стабильной производительностью в процессе всего цикла резания при условии синхронизированного износа связки и экспозиции новых алмазов взамен разрушенных алмазных зерен [7–9].

Для создания высококачественного инструмента для резания сталей и чугунов со спеченной связкой необходимо решить две задачи: увеличить твердость, прочность и ударную вязкость связки

[10–12], а также при слабом износе связки обеспечить ее способность прочно удерживать зерно алмаза или других видов СТМ.

Ранее было показано [13–16], что упрочнение металлических связок наночастицами является перспективным направлением усовершенствования служебных характеристик (ресурс, алмазоудержание) режущего инструмента при незначительном изменении состава и технологической схемы производства. Упрочнение связки при наномодифицировании объясняется блокированием движения единичных дислокаций или мощных дислокационных образований (границ зерен и субзерен). Границы зерен и субзерен, блокируемые дисперсными частицами, сами по себе также служат препятствиями к движению дислокаций. Значительный эффект дисперсного упрочнения связок на основе никеля, железа и меди достигается при введении наночастиц WC, ZrO<sub>2</sub> и hBN [13,17].

Как известно, алмазы при взаимодействии с металлами группы железа подвержены графитизации. Однако алмаз имеет значительное преимущество перед аналогами по статической и динамической прочности [18], из-за чего его полная замена в инструменте нежелательна [19, 20]. Перспективна частичная замена алмаза на кубический нитрид бора (cBN), который обладает высокой термостойкостью и химически инертен по отношению к материалам группы железа [21].

В данной работе предпринята попытка одновременного решения следующих задач:

— увеличение механических свойств связки на основе меди путем легирования ее никелем для повышения ударной вязкости, а также наночастицами WC, ZrO<sub>2</sub> и гексагонального нитрида бора hBN для повышения прочности и твердости;

— поиск оптимального соотношения алмаза и кубического нитрида бора cBN в инструменте для резания сталей и чугунов.

## Методика исследований

В качестве исходных компонентов связки использовали порошок марки Next100 (производство фирмы «Eurotungstene», Франция) состава (мас.%) 50Cu—26Co—24Fe со средним размером частиц 5 мкм, а также порошок карбонильного никеля марки ПНК-УТЗ (ОАО «Кольская ГМК», Россия) со средним размером частиц 10 мкм. Содержание примесей в данных порошках не превышало 1 мас.%. Модификаторами выбраны нанопорошки WC (ООО «Плазмотерм», Россия) и ZrO<sub>2</sub> (ОАО «Сибирский химический комбинат», Россия) дисперсностью 20—40 и 20—100 нм соответственно, а также порошок hBN (ОАО «Метсинтез», Россия) со средним размером частиц ~10 мкм и содержанием примесей <2 мас.%.

Для изготовления перлин для канатных пил и сегментов для ОСК были использованы порошки алмаза марки SDB 1100 и cBN марки ABN 605 (рис. 1) производства «Element Six» (Люксембург) крупностью 40/50 меш со статической прочностью 320 и 80 Н соответственно. Данная марка порошков алмаза выбрана с учетом его высокой термостойкости (до 1100 °С) и способности работать с широким спектром материалов. Порошок cBN марки ABN 605 применяется для изготовления металлообрабатывающего инструмента, прежде всего на гальванических металлических связках.

Смешивание компонентов связки, а также введение наномодификаторов осуществляли в планетарной центробежной мельнице (ПЦМ) МПП-1 (ООО «ТТД», Россия) по следующему режиму: скорость вращения водила и барабанов составляла 360 и 620 об/мин соответственно, соотношение масс порошка и размольных тел — 1 : 15, продолжительность обработки — 3 мин. В таких условиях достигается равномерное распределение компонентов по всему объему смеси.

Холодное прессование (брикетирование) перлин для канатных пил и сегментов ОСК выполняли на прессах КР-3 и РР-35 («Dr. Fritsch», Германия). Пресс-формы для заготовок перлин и сегментов, массы навесок выбирались с учетом геометрических параметров инструмента.

Горячее прессование предварительно брикетированных заготовок проводили на установке DSP-475 («Dr. Fritsch», Германия) с использованием графитовых пресс-форм, задающих геометрию готового сегмента. Горячее прессование образцов осуществляли при максимальной температуре 850 °С, максимальном давлении 35 МПа, продолжительности изотермической выдержки 3 мин.

Остаточную пористость горячепрессованных образцов определяли методом гидростатического взвешивания на аналитических весах фирмы A&D (Япония) с точностью 10<sup>-4</sup> г. Твердость по Роквеллу (HRB) измеряли на твердомере «Rockwell 600-MRD» («Wolpert Wilson Instruments», Германия). Испытания на трехточечный изгиб проводили на универсальной сервогидравлической машине LF-100 фирмы «Walter + bai» (Швейцария) с внешним цифровым контроллером (EDC). Предел прочности на изгиб ( $\sigma_{изг}$ ) устанавливали с помощью программного обеспечения, позволяющего автоматически регистрировать и проводить статистическую обработку результатов испытания (программа «DIONPro»).

Фазовый состав был определен методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН 4-07 с использованием CoK<sub>α</sub>-излучения в геометрии Брега—Брентано.

Микроструктуру связок, сегментов и перлин изучали на сканирующем электронном микроскопе S-3400N («Hitachi», Япония), оснащенный рентгеновским энергодисперсионным спектрометром NORAN. Информацию о составе фаз или структурных составляющих получали методом рентге-

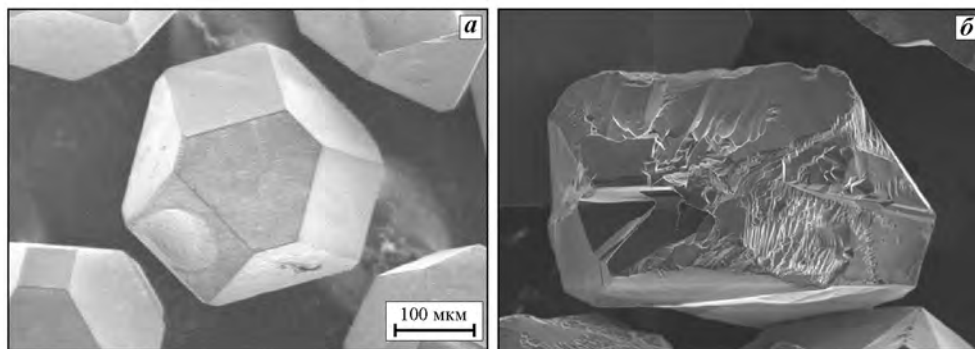


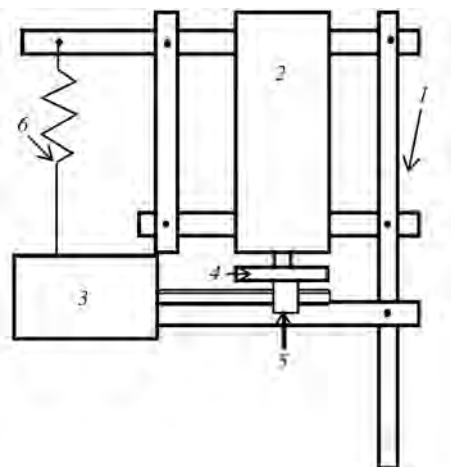
Рис. 1. Морфология зерен алмаза марки SDB 1100 (а) и cBN марки ABN 605 (б)

новского микроанализа при ускоряющих напряжениях 5–20 кВ.

Характер взаимодействия связки с зернами СТМ изучали на установке локальной спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) с микроскопической приставкой на базе спектрометра TRIAX 552 («Jobin Yvon», США) и детектора «CCD Spec-10» (2KBUV, 2048×512) («Princeton Instruments», США) с notch-фильтрами для подавления возбуждающих лазерных линий.

Взаимодействие зерен cBN со связкой и наночастицами исследовали на Оже-электронном спектрометре модели PHI-680 (Auger nano probe) фирмы «Physical Electronics» (США) при следующих параметрах: энергия первичного пучка  $E = 1 \pm 10$  кэВ, ток первичного пучка  $j = 10$  нА, диаметр первичного пучка 40 нм, глубина анализа  $t = 20$  Å.

Выбор оптимального соотношения содержания алмаза и cBN проводился по результатам испытаний перлин при резке стали на экспериментальной установке (рис. 2). Ее основными узлами являются два электродвигателя, один из которых неподвижно закреплен на раме. Частота вращения его выходного вала — 250 об/мин. К выходному валу первого электродвигателя крепится обрабатываемое изделие — диск из стали марки Сталь 3. Второй электродвигатель прикреплен к подвижной раме, скорость вращения его вала 60 об/мин. Резбовым соединением к данному электродвигателю присоединена шпилька с закрепленной на ней перлиной. Перед началом испытания по-



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки для резки стального диска перлиной

1 – рама; 2 – первый электродвигатель с закрепленным на роторе диском обрабатываемого материала; 3 – второй электродвигатель; 4 – стальной диск; 5 – шпилька с перлиной; 6 – пружина

ложение второго электродвигателя фиксируется с помощью пружины, за счет чего осуществляется прижим шпильки с перлиной к диску. Данная установка имеет водяную систему охлаждения с максимальным расходом воды 1 л/мин. Каждая перлина испытывалась в течение 90 мин. Так как при обработке перлиной стального диска невозможно прорезать его насквозь (из-за малых габаритов перлины), в качестве основного параметра, определяющего производительность, была взята убыль массы диска, а не площадь обработанной поверхности. По окончании времени испытания стальной диск и перлина снимались с установки и взвешивались на весах. По результатам взвешиваний рассчитывались удельный ресурс ( $R$ , г/г) и производительность ( $S$ , г/ч) перлин:

$$R = M/m, \quad (1)$$

где  $M$  — убыль массы диска, г;  $m$  — убыль массы перлины, г;

$$S = M/\tau, \quad (2)$$

где  $M$  — убыль массы диска за время резания  $\tau$ , г;  $\tau$  — время резания, ч.

После завершения испытаний также определялось количество целых, вырванных и разрушенных зерен СТМ в рабочем слое перлины.

Для изготовления ОСК диаметром 500 мм к стальному корпусу с помощью установки СВМ-200 фирмы «Dr. Fritsch» припаивались сегменты размером 40×4,2×9 мм, изготовленные по описанной выше технологии. Испытания ОСК проводили на мостовом отрезном станке «Алмаз-3» (Россия) с водяным охлаждением (10 л/мин) (рис. 3). В качестве обрабатываемого материала были использованы отливки из чугуна марки СЧ20. Скорость вращения ОСК составляла 3000 об/мин. Каждые 60 мин во время испытаний измерялись средние



**Рис. 3.** Станок для алмазной резки «Алмаз-3»

значения высот сегментов и рассчитывалась площадь реза, проделанного ОСК.

Производительность инструмента была определена по площади обработанной поверхности (см<sup>2</sup>):

$$S = V\tau, \quad (3)$$

где  $V$  — скорость резания, см<sup>2</sup>/ч;  $\tau$  — время резания, ч.

## Результаты и их обсуждение

### Выбор базового состава связки

Легирование стандартной связки Next100 никелем проводилось с целью повышения ударной вязкости. Так как порошки никеля и Next100 имели близкую дисперсность, то при смешивании в ПЦМ удалось достичь их равномерного распределения, а после горячего прессования — однородной структуры.

Для подбора оптимального состава базовой связки были получены горячепрессованные образцы с содержанием никеля ( $X$ ) от 15 до 75 мас.% и определены их физико-механические свойства (табл. 1). Максимальными значениями прочности и твердости обладали образцы сплава Next100. Введение никеля приводило к пропорциональному снижению данных характеристик. Пористость всех образцов после горячего прессования изменялась в пределах 2,5–5,0 %.

Введение никеля в состав связки приводит к почти линейному повышению ударной вязкости. Изменение характеристик пластичности рассматриваемых горячепрессованных сплавов можно наблюдать из сопоставления величин стрелы прогиба ( $f$ ) на деформационных кривых при

изгибе (рис. 4). У образцов составов Next100 и Next100+15%Ni разрушение имеет хрупкий характер. Кривые деформации составов с концентрацией никеля  $\geq 25$  мас.% имеют участки, характерные для диаграмм изгиба пластически деформирующихся материалов, что указывает на их высокую пластичность.

Исходя из полученных результатов, в качестве базовой связки был выбран состав Next100—30%Ni (обозначается N'), который по сравнению с Next100 имеет в 2,5 раза большую ударную вязкость при снижении прочности менее чем на 10 %.

Исследование фазового состава образца горячепрессованной связки N' показало наличие в нем двух фаз (рис. 5, табл. 2). Первая фаза имеет гранцентрированную кубическую решетку — такую же, как у меди и никеля. Период данной решетки — 3,582 Å, что меньше, чем у меди (3,615 Å), но больше, чем у никеля (3,524 Å). Так как данные элементы неограниченно растворяются друг в друге, было сделано предположение, что обнаруженная фаза является твердым раствором меди в никеле — (Ni), образованным в результате взаимной диффузии компонентов при горячем прессовании. Вторая фаза имеет объемно-центрированную кубическую решетку с периодом 2,855 Å, что немного меньше, чем у чистого  $\alpha$ -Fe (2,870 Å). Такое уменьшение периода решетки  $\alpha$ -Fe характерно для растворения в нем кобальта [13]. Поэтому данная фаза является твердым раствором кобальта в железе — (Fe). Фаза (Fe) присутствует в исходном порошке Next100 [13] и остается в образцах после горячего прессования.

Таблица 1. Физико-механические свойства связок Next100 + Ni в зависимости от содержания никеля

Ni, мас.%	$\Pi$ , %	HRB	$\sigma_{изг}$ МПа	KCU, Дж/мм <sup>2</sup>
0	3,8	100	1200±20	2,0±0,3
15	3,7	96	1160±30	3,6±0,3
25	2,5	95	1120±40	4,5±0,5
30	3,5	95	1100±20	5,0±0,5
35	3,5	91	1090±10	5,6±0,3
45	2,9	89	1040±20	7,2±0,4
55	2,6	84	950±40	8,8±0,7
65	3,0	81	910±20	10,4±0,8
75	4,9	75	850±10	12,5±1,7

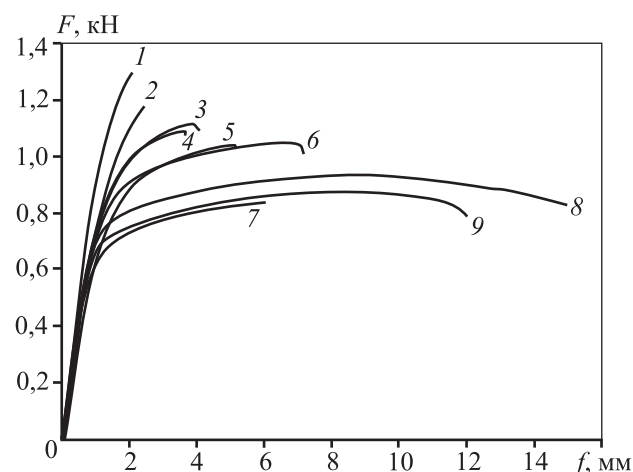


Рис. 4. Деформационные кривые горячепрессованных образцов из сплава Next100—X%Ni X, мас.% — 0 (1), 15 (2), 25 (3), 30 (4), 35 (5), 45 (6), 55 (7), 65 (8), 75 (9)

Таблица 2. Фазовый состав образца горячепрессованной связки N'

Фаза	Структурный тип	Период, Å	Доля, мас. %
(Ni)	cF4/1	3,582	82
(Fe)	cI2/1	2,855	18

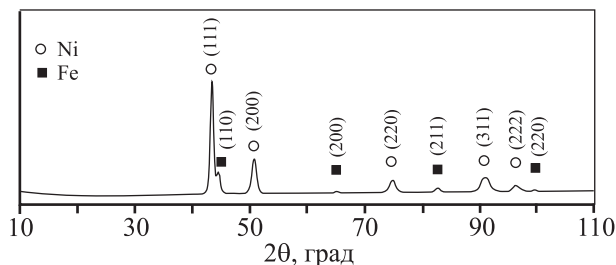


Рис. 5. Рентгенограмма образца горячепрессованной связки N'

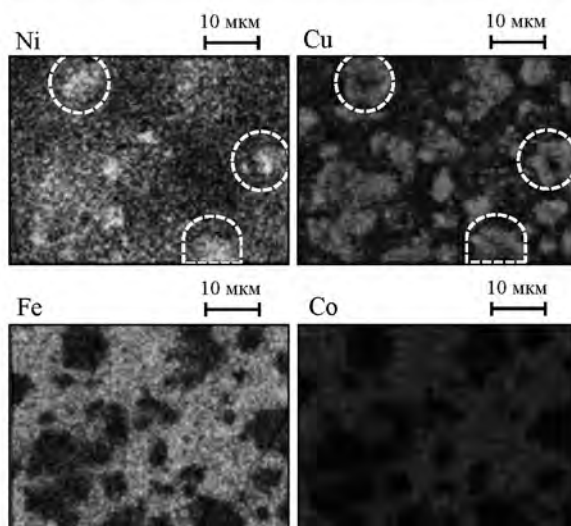
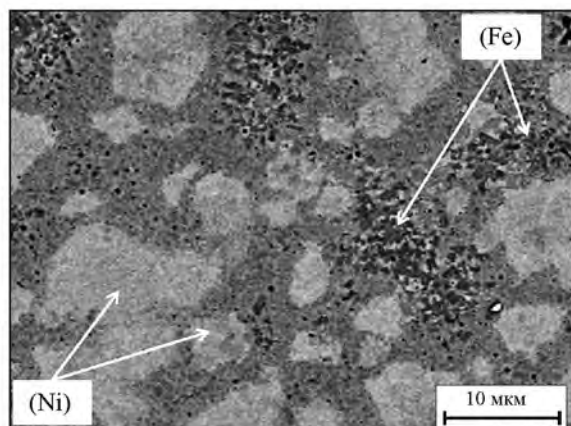


Рис. 6. Структура горячепрессованной связки N' и карты распределения элементов

Белым штрихом выделены зерна с центральной частью, обогатившейся никелем, и периферийной частью, обогатившейся медью

Исследования структуры показали, что зерна фазы (Ni) равномерно распределены в матрице, состоящей из фазы (Fe) (рис. 6). Зерна (Ni) наследуют форму и размеры исходных частиц порошка никеля и являются неоднородными по химическому составу — их центр обогащен никелем, а периферийная часть — медью (области, выделенные белым штрихом на рис. 6).

### Наномодифицирование связки N'

Наночастицы  $ZrO_2$  и  $hBN$  являются химически инертными модификаторами по отношению к компонентам связки Next100+30%Ni вплоть до температур горячего прессования сегментов и перлин. Карбид вольфрама не взаимодействует с медью, но может в небольших концентрациях растворяться в кобальте, железе и никеле при температуре 850 °C [22]. С целью оптимизации концентраций вводимых наночастиц были изготовлены компактные образцы, содержавшие 1,7–6,8 мас.% WC (1–4 об.%), 0,32–2,56 мас.%  $ZrO_2$  (0,5–4 об.%). Положительный эффект введения в сплав частиц  $hBN$  был обнаружен при значительно меньших его концентрациях: 0,01–1,0 мас.%.

Зависимости предела прочности при изгибе от концентраций наномодификаторов имели экстремальный характер. Лучшим сочетанием физико-механических свойств обладали образцы, содержащие 5,1 мас.% WC, 0,64 мас.%  $ZrO_2$ , 0,1 мас.%  $hBN$  (табл. 3, выделено жирным шрифтом).

Как показано в работах [13, 17] на примере связок на основе никеля, железа и меди, упрочнение сплавов наночастицами WC и  $ZrO_2$  происходит по механизму Орована. При этом наночастицы располагаются преимущественно по границам зерен, на тройных стыках и в некоторых случаях оказываются внутри тела зерна [22].

Возможной причиной роста механических свойств связки N' при введении  $hBN$  является уменьшение размера ее зерна. Согласно [13], в процессе обработки в ПЦМ частицы  $hBN$  существенно измельчаются и приобретают чешуйчатую форму с длиной чешуек менее 100 нм и толщиной около 10 нм. Они блокируют часть поверхности частиц Next100 и Ni, а также препятствуют движению большеугловых границ зерен при горячем прессовании и способствуют межзеренному проскальзыванию [23].

По результатам испытаний физико-механических свойств также можно сделать вывод о том, что предварительное механическое активиро-

Таблица 3. Механические свойства связки Next100+30%Ni, модифицированной различными наночастицами

Состав, мас. %	<i>P</i> , %	<i>HRB</i>	$\sigma_{изг}$ , МПа	<i>KCU</i> , Дж/мм <sup>2</sup>
N'	2,4	95	1080±30	4,4±0,5
N' <sub>МА</sub>	3,5	95	1100±20	5,0±0,5
N'-1,7%WC	4,5	98	1080±60	4,3±0,4
N'-3,4%WC	4,9	99	1120±20	4,2±0,5
<b>N'-5,1%WC</b>	<b>5,0</b>	<b>99</b>	<b>1180±20</b>	<b>4,5±0,6</b>
N'-6,8%WC	5,4	99	1100±50	3,7±0,8
N'-0,32%ZrO <sub>2</sub>	3,8	100	1150±40	4,8±0,4
<b>N'-0,64%ZrO<sub>2</sub></b>	<b>3,6</b>	<b>102</b>	<b>1160±50</b>	<b>4,6±0,5</b>
N'-1,28%ZrO <sub>2</sub>	4,3	102	1110±30	3,6±0,9
N'-2,56%ZrO <sub>2</sub>	4,2	103	960±140	2,8±1,0
N'-0,01%hBN	3,1	102	1160±30	4,8±0,4
<b>N'-0,1%hBN</b>	<b>3,0</b>	<b>102</b>	<b>1260±10</b>	<b>5,2±0,5</b>
N'-0,5%hBN	3,6	100	1140±30	4,4±0,8
N'-1%hBN	4,0	98	1040±30	3,5±0,8

вание (МА) порошковой смеси в ПЦМ (образец N'<sub>МА</sub>) оказывает меньшее влияние на механические свойства связки, чем введение в состав связки наночастиц.

### Определение оптимального соотношения алмаза и cBN в инструменте

Для определения оптимального соотношения алмаза и cBN в рабочем слое инструмента была изготовлена и испытана опытная партия перлин. В качестве связки был использован базовый состав N', в который вводились СТМ в следующих соотношениях «алмаз + cBN», мас. %: 100 + 0; 75 + 25; 50 + 50; 25 + 75. Результаты испытаний представлены на рис. 7.

Максимальной производительностью до момента полной потери режущих свойств обладали перлины, в которых алмаз на 25 % заменен зернами cBN. Прирост производительности в данном случае составил 20 % по сравнению с перлинами, содержащими только алмаз. Дальнейшее повышение содержания cBN приводит к снижению эксплуатационных характеристик.

Зависимость удельного ресурса от содержания cBN в рабочем слое в целом повторяет зависимость производительности. Это связано с тем, что износ перлин не превышал высоты одного зерна СТМ и составлял около 300 мкм. Следовательно, убыль массы всех вариантов перлин в процессе испытаний почти совпадала.

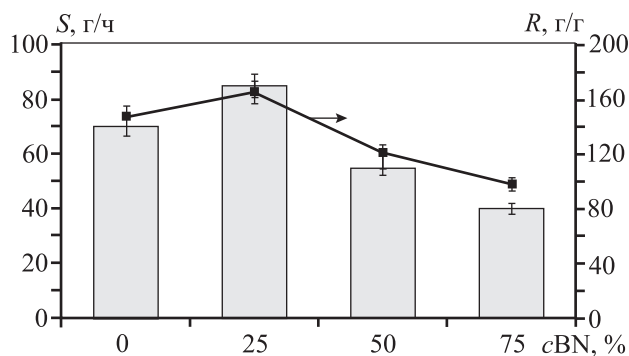


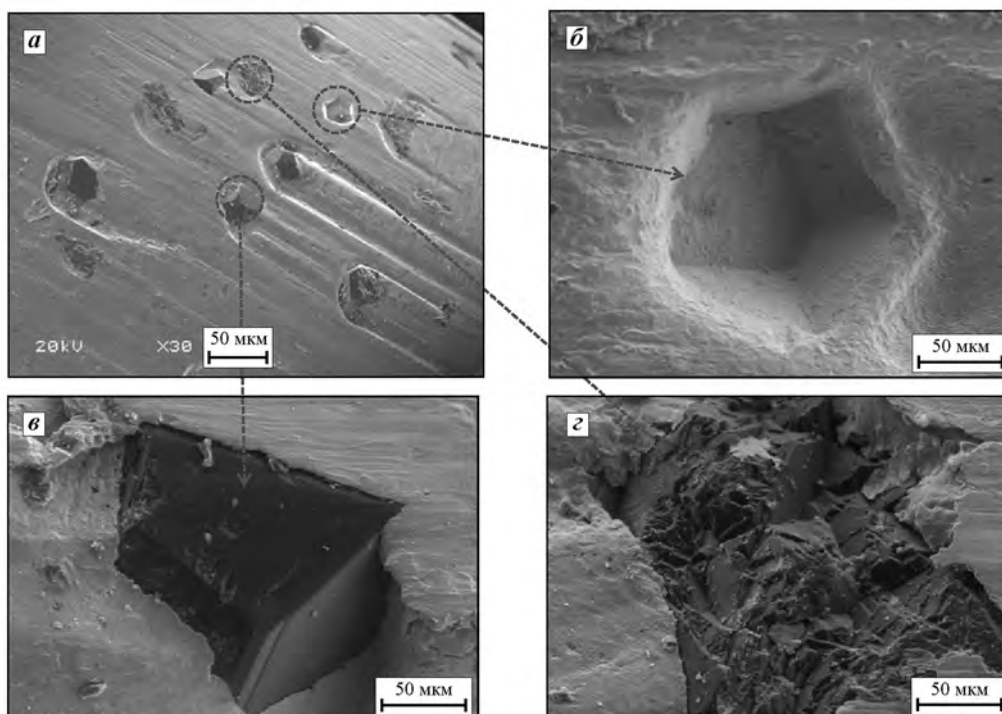
Рис. 7. Производительность (*S*) и удельный ресурс (*R*) перлин с разным соотношением алмаз/cBN при резке стали

Такой характер зависимости производительности резания от содержания cBN связан с особенностями износа зерен алмаза и cBN и их закрепления в связке. Используемый в работе порошок алмаза имеет правильную кубооктаэдрическую форму и хуже удерживается связкой за счет механического зацепления, в отличие от зерен cBN, имеющих сложную форму и большое количество сколов на гранях (см. рис. 1). На рис. 8, а приведен снимок перлины с соотношением алмаз/cBN = 75/25 после испытаний по резке стали. Как видно, cBN сохраняется в рабочем слое, тогда как на месте зерен алмаза обнаруживаются кратеры, поверхность которых повторяет их кубооктаэдрическую огранку (рис. 8, б). По мере увеличения содержания cBN количество следов от выпадения СТМ уменьшается.

Однако полная замена алмаза на cBN в инструменте, предназначенном для обработки стали и чугуна, не является целесообразной. Зерна cBN из-за невысокой прочности разрушались в результате многочисленных сколов при контакте с обрабатываемым материалом, в то время как частицы алмаза дольше сохраняли целостность (см. рис. 8, в, г). Алмаз, помимо своей основной задачи (резания), принимает на себя большую часть нагрузки, приходящейся на СТМ при работе инструмента, и, тем самым, обеспечивает более высокую работоспособность cBN.

### Исследование взаимодействия cBN со связкой

Взаимодействие алмаза с элементами, входящими в состав известных связок для режущего инструмента, достаточно хорошо изучено [24, 25]. Контакт с такими элементами, как железо, хром, никель и кобальт, при горячем прессовании приводит к частичной деградации поверхности алмаза вследствие графитизации. Известно, что cBN хими-



**Рис. 8.** Поверхность перлины после испытаний по резке стали (*а*) со следами от вырывов алмаза (*б*) и изношенными зернами алмаза (*в*) и *cBN* (*г*)

чески инертен по отношению к большинству элементов связок. Тем не менее закрепление зерен *cBN* в связке происходит не только за счет механического зацепления, но и в результате химического взаимодействия с некоторыми компонентами связки. Для исследования процессов, происходящих на границе *cBN*—связка, были сняты рамановские спектры с поверхности зерен *cBN* на изломах горячепрессованных перлин. Также для сравнения был снят спектр из центра хрупко разрушенного зерна (рис. 9). Базовая связка *N'* характеризуется высокой адгезией к зернам *cBN*, поэтому при разрушении перлины трещины проходят не только по границе раздела со связкой, но и через зерна *cBN*.

Исследования зерен *cBN* показали их химическую неоднородность в зависимости от удаленности от границы раздела со связкой. На спектре, снятом из центра хрупко разрушенного зерна, присутствуют два явных пика —  $1050$  и  $1305\text{ см}^{-1}$ , соответствующие чистому *cBN*. Линии, которые могли бы относиться к боридам или нитридам из-за взаимодействия СТМ со связкой, отсутствуют. Также, судя по полученному спектру, в центре зерна *cBN* после горячего прессования не происходит перехода из кубической модификации в гексагональную.

Для анализа участка *cBN* на границе раздела со связкой было выбрано неразрушенное зерно на из-

ломе перлины. В спектре, снятом с этой области, также присутствуют пики  $1050$  и  $1305\text{ см}^{-1}$ , однако они имеют большую ширину. Это может быть связано с повышенной дефектностью кристалла *cBN* [26].

Наличие широких пиков в области малых волновых чисел  $k$  ( $350$  и  $770\text{ см}^{-1}$ ) указывает на то, что химический состав зерна *cBN* не является стехиометрическим и данные области богаты бором [27, 28]. Происхождение этих пиков связано с разрушением коротких и средних связей в наноклстерах бора или с частичной аморфизацией *cBN*, так как обычно они встречаются в спектрах аморфного бора [27]. На присутствие в поверхности зерен *cBN* отдельных нанокластеров бора указывает небольшой пик при  $k = 1020\text{ см}^{-1}$ . Этот пик отображает связь В—В в поликристаллических материалах на основе бора [29]. Таким образом, можно предположить, что свободный бор образуется на поверхности зерен *cBN* в результате их химического взаимодействия с металлической связкой (при растворении в ней азота).

Исследование поверхностных слоев зерен *cBN* и их взаимодействия со связкой также проводили методом Оже-спектроскопии, так как данный метод позволяет получить информацию о составе тонкого (до  $2\text{ нм}$ ) поверхностного слоя. Анализ участка поверхности, находящегося на границе



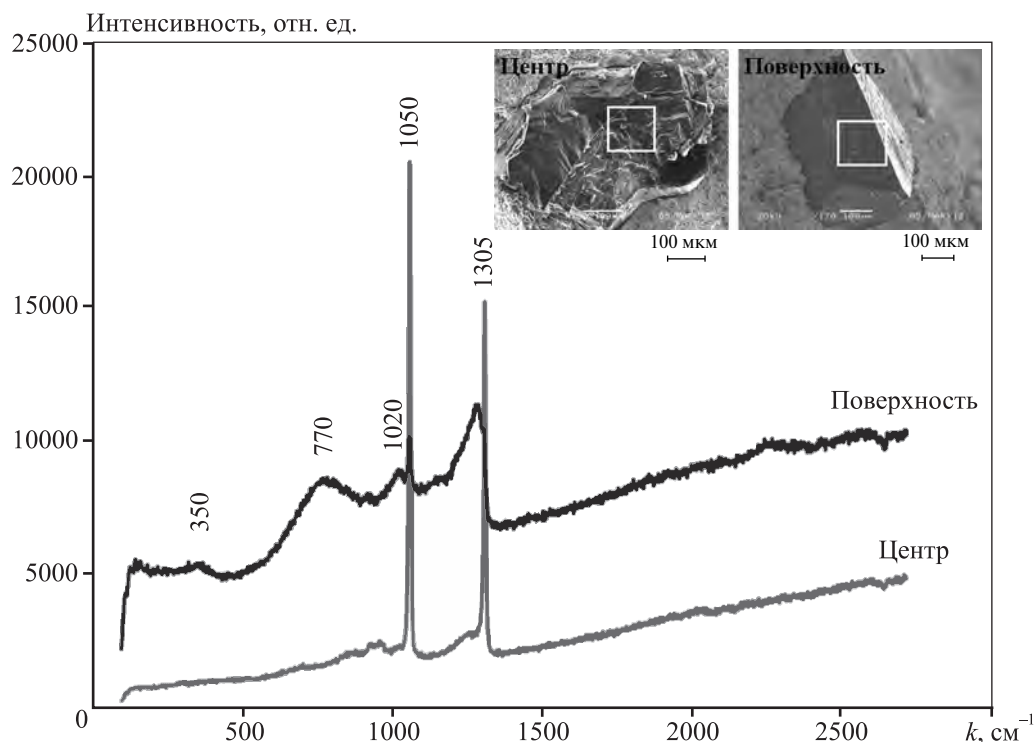


Рис. 9. Рамановский спектр, снятый с центра хрупко разрушенного зерна cBN и с границы раздела зерна со связкой

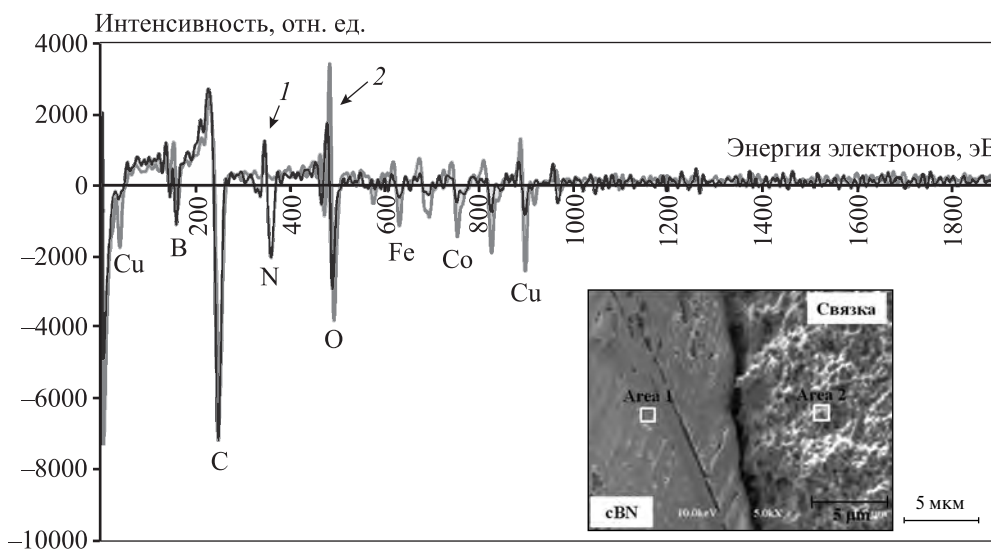


Рис. 10. Оже-спектры, снятые с поверхности cBN (обл. 1) и связки (обл. 2)

cBN—связка, показал, что зерно СТМ практически целиком покрыто тонким слоем металлов, входивших в состав связки (обл. 1 на рис. 10). В спектре присутствуют не только линии, соответствующие связке, но и линии В и N, что свидетельствует о формировании очень тонкого слоя из компонентов связки (1–2 нм) на грани кристалла cBN или его несплошности.

Для изучения влияния наночастиц на взаимо-

действие зерен cBN со связкой по аналогичным режимам были изготовлены перлины со связками N'—5,1мас.%WC, N'—0,64мас.% ZrO<sub>2</sub> и N'—0,1мас.%hBN. Границы раздела cBN/связка исследовались на изломах данных перлин. Влияние наномодификаторов на взаимодействие cBN со связкой обнаружено только при введении WC. На рис. 11 приведены карты распределения элементов с поверхности зерна cBN на изломе сегмента. На не-

которых участках кристалла *c*BN слой связки толще (рис. 11, *a*, светло-серые области). Данные о химическом составе этих областей, полученные методом энергодисперсионной спектроскопии, указывают на повышенное содержание железа и вольфрама. Следовательно, трещина при разрушении сегментов проходила по связке, а не по границам раздела «*c*BN—наночастица» или «наночастица—связка», что свидетельствует о повышении адгезии в присутствии WC. Вероятно, это связано с тем, что наночастицы WC химически взаимодействуют со связкой и зерном *c*BN, формируя промежуточный адгезионный слой. С одной стороны, они частично растворяются в компонентах связки в процессе горячего прессования (в Co и Fe — до

5 мас.%, в Ni — до 7 мас.%) [30]. С другой стороны, происходит взаимодействие содержащегося в наночастицах в качестве примеси металлического вольфрама с нанокластерами бора на поверхности зерен *c*BN с образованием боридов вольфрама, что возможно при температуре 850 °C [31].

### Испытания ОСК по резке стали и чугуна

На рис. 12 показаны результаты испытаний экспериментальных ОСК диаметром 500 мм со связками Next100, и Next100—30%Ni (N'), в том числе модифицированными наночастицами WC, ZrO<sub>2</sub> и *h*BN. Общая концентрация СТМ в инструментах составляла 20 об.%, соотношение алмаза к *c*BN — 3 : 1. Для сравнения их эксплуатационных

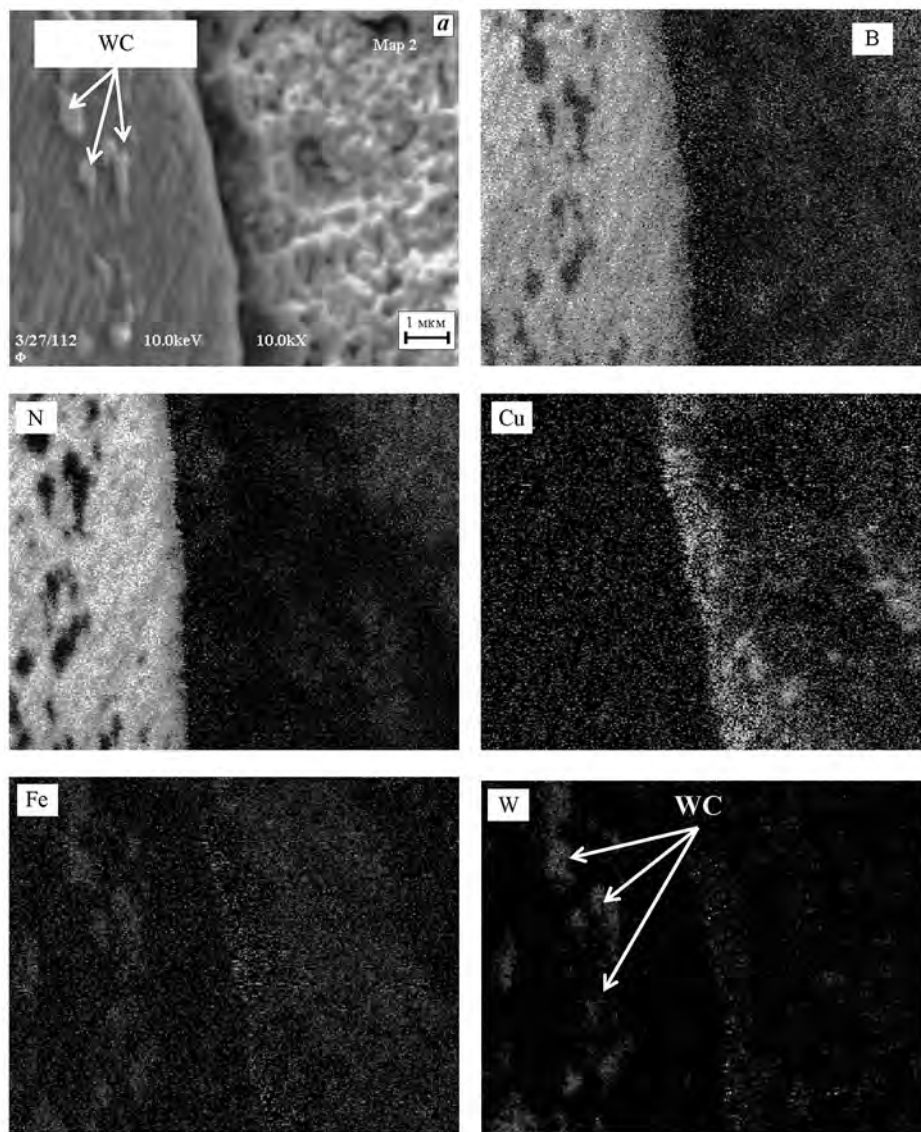


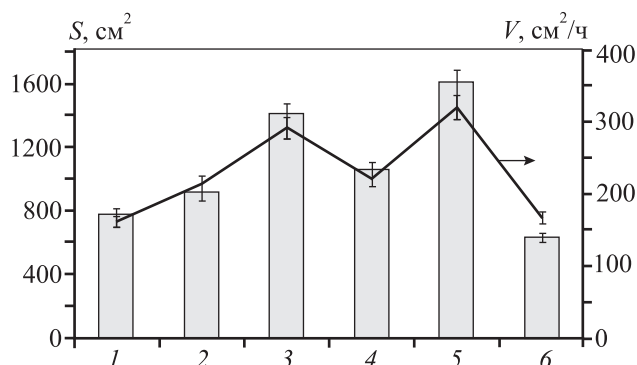
Рис. 11. Общий вид границы раздела кристалла *c*BN со связкой (*a*) и карты распределения элементов в характеристических излучениях ( $K_{\alpha}$ )

характеристик с известными мировыми аналогами, в тех же условиях проведены испытания ОСК «Boomrad» (Франция) того же диаметра.

Среди испытанных образцов инструмента меньшей производительностью и скоростью резания обладал ОСК со связкой Next100. Его сегменты были самыми хрупкими и частично откалывались в процессе резания, что связано с низкой ударной вязкостью сплава Next100. Легирование этого сплава никелем позволяет увеличить пластичность связки и избежать быстрого разрушения сегментов. Введение наномодификаторов дополнительно повышает производительность инструмента. Оксид циркония является химически инертной добавкой как к связке, так и к зернам СТМ. Поэтому данные наночастицы оказывают влияние на служебные характеристики инструмента только путем повышения механических свойств связки — благодаря увеличению ее сопротивления пластической деформации в областях, окружающих зерна СТМ. Это приводит к более надежному удержанию алмаза или *cBN* в рабочем слое и, следовательно, сохранению режущих свойств.

При введении наночастиц WC также реализуется механизм дисперсного упрочнения связки. Кроме того, как показано выше (см. рис. 11), благодаря химическому взаимодействию с компонентами базовой связки и зернами *cBN* наночастицы WC способствуют более прочному удержанию СТМ в рабочем слое. Это становится крайне важным в том случае, если инструмент не работает в режиме самозатачивания.

Лучшими эксплуатационными свойствами обладал ОСК со связкой, модифицированной нано-



**Рис. 12.** Результаты испытаний ОСК по резке чугуна марки СЧ20

$S$  — производительность,  $V$  — скорость резания  
Связки — Next100 (1), N' (2), N'–5,1%WC (3), N'–0,64%ZrO<sub>2</sub> (4), N'–0,1%hBN (5), ОСК «Boomrad» (6)

частицами *hBN*. Это может быть обусловлено рядом причин и связано с особенностями строения *hBN* и его свойствами как сухой смазки. Благодаря введению *hBN* в меньшей степени изнашивается связка на границе раздела с зернами СТМ, предотвращается схватывание связки с обрабатываемым материалом в зоне контакта при высоких температурах. Частицы *hBN* могут покрывать часть поверхности алмазов, предохраняя их от контакта с металлами — катализаторами перехода в гексагональную модификацию (железом, кобальтом, никелем) и, таким образом, от графитизации при горячем прессовании.

ОСК марки «Boomrad» обладал самой низкой производительностью среди испытанных инструментов. Исследование поверхности его рабочего слоя после испытаний показало значительное количество следов от выбитых алмазов в рабочем слое, что указывает на слабую удерживающую способность его связки.

## Выводы

1. Легирование стандартных связок Next100 никелем позволяет в 2,5 раза повысить их ударную вязкость при сохранении прочности и твердости, благодаря чему увеличивается стойкость сегментов ОСК при обработке стали и чугуна.

2. Модифицирование связки Next100–30%Ni наночастицами WC, ZrO<sub>2</sub> и *hBN* приводит к возрастанию ее прочности на 100–150 МПа и твердости на 5–7 HRB. Образцы режущих инструментов с такими связками продемонстрировали лучшее сочетание производительности и скорости резания при обработке серого чугуна СЧ20.

3. Замена 25 % алмаза на *cBN* в рабочем слое режущего инструмента позволяет достичь повышения его производительности благодаря более надежному механическому удержанию монокристаллов данного вида СТМ связкой.

4. Установлено формирование нанокластеров аморфного бора на границе раздела *cBN*/связка и растворение небольшого количества азота в компонентах связки при горячем прессовании. Связка Next100–30%Ni характеризуется хорошей адгезионной прочностью по отношению к зернам *cBN*. Адгезия повышается при наличии в связке наночастиц WC.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы в рамках научного проекта № 15-38-70019 «мол\_а\_мос».*

## Литература/References

1. Sung C.-M. Brazed diamond grid: a revolutionary design for diamond saws. *Diamond Relat. Mater.* 1999. Vol. 8. Iss. 8—9. P. 1540—1543.
2. Konstanty J. Powder metallurgy diamond tools. Oxford: Elsevier, 2005.
3. Bakori A., Szymariski A. Practical uses of diamond. Warsaw: Ellis Horwood & Polish Scientific Publishers, 1993.
4. Sato K., Yokoyama T., Suzuki K. Production of electro-deposited diamond wheels and grinding performance for hard metals and ceramics. *J. Mater. Process. Technol.* 1996. Vol. 62. P. 303—308.
5. Li Y., Li G., Jiang H., He Y. New type of matrix material for the manufacture of electroplated diamond tools. *Ind. Diamond Rev.* 2002. Vol. 62. P. 259—262.
6. De Resende L.W., Corat E.J., Trava-Airoldi V.J., Leite N.F. Multi-layer structure for chemical vapor deposition diamond on electroplated diamond tools. *Diamond Relat. Mater.* 2001. Vol. 10. P. 332—336.
7. Denkena B., Köhler J., Ermisch A. Wire cutting tool concepts for steel machining. *Adv. Mat. Res.* 2011. Vol. 325. P. 238—243.
8. Tönshoff H.K., Hillmann-Apmann H. Diamond tools for wire sawing metal components. *Diamond Relat. Mater.* 2002. Vol. 11. Iss. 3—6. P. 742—748.
9. Köhler J., Ermisch A., Denkena B. Tool concepts for wire cutting of reinforced concrete. In: *1-st Int. conf. on stone and concrete machining*. Hannover, 2011. P. 6.
10. Amaral P.M., Coelho A., Anjinho C.A., Fernandes J.C., Rosa L.G. Evaluation of the relationship between diamond tool wear performance and the mechanical properties of the individual metallic binders. *Adv. Mater. Forum V.* 2010. Vol. 636—637. P. 1467—1474.
11. Kononov V.A., Aleksandrov V.A., Levin M.D. Influence of the strength of diamond containment and the rate of abrasive wear of a binder on the serviceability of a diamond-abrasive stone-cutting tool. *Sintech. Almaz.* 1975. P. 26—28.
12. Bogatyreva G.P., Nevstruev G.F., Il'nitskaya G.D., Kononov V.A., Tkach V.N. The possibilities for improvement of the strength of diamond grit retention in a binder. *Sverkh-tverdye Materialy.* 2001. Iss. 2. P. 20—25.
13. Loginov P.A., Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Zaitsev A.A., Sidorenko D.A. Evolution of the microstructure of Cu—Fe—Co—Ni powder mixtures upon mechanical alloying. *Powder Technol.* 2015. Vol. 276. P. 166—174.
14. Tokova L.V., Zaitsev A.A., Kurbatkina V.V., Levashov E.A., Sidorenko D.A., Andreev V.A. The features of influence of ZrO<sub>2</sub> and WC nanodispersed additives on the properties of metal matrix composite. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2014. Vol. 55. Iss. 2. P. 186—190.
15. Sidorenko D.A., Zaitsev A.A., Kirichenko A.N., Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Loginov P.A., Rupasov S.I., Andreev V.A. Interaction of diamond grains with nanosized alloying agents in metal—matrix composites as studied by Raman spectroscopy. *Diamond Relat. Mater.* 2013. Vol. 38. P. 59—62.
16. Sidorenko D.A., Zaitsev A.A., Kirichenko A.N., Kurbatkina V.V., Levashov E.A., Sevast'yanov P.I., Rupasov S.I. Modification of the Fe—Cu—Co—Sn—P metal matrix with various forms of carbon nanomaterials. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 55. Iss. 6. P. 639—644.
17. Zaitsev A.A., Sidorenko D.A., Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Rupasov S.I., Andreev V.A., Sevast'yanov P.V. Development and application of the Cu—Ni—Fe—Sn-based dispersion-hardened bond for cutting tools of superhard materials. *J. Superhard Mater.* 2012. Vol. 34. Iss. 4. P. 270—280.
18. Monteiro S.N., Skury A.L.D., de Azevedo M.G., Bobrovnichii G.S. Cubic boron nitride competing with diamond as a superhard engineering material — an overview. *J. Mater. Res. Technol.* 2013. Vol. 2. Iss. 1. P. 68—74.
19. Song Y., Nezu K., Park C.-H., Moriwaki T. Tool wear control in single-crystal diamond cutting of steel by using the ultra-intermittent cutting method. *Int. J. Machine Tools Manufact.* 2009. Vol. 49. Iss. 3—4. P. 339—343.
20. Lane B.M., Shi M., Dow T.A., Scattergood R. Diamond tool wear when machining Al6061 and 1215 steel. *Wear.* 2010. Vol. 268. Iss. 11—12. P. 1434—1441.
21. Neo K.S., Rahman M., Li X.P., Khoo H.H., Sawa M., Maeda Y. Performance evaluation of pure CBN tools for machining of steel. *J. Mater. Process. Technol.* 2003. Vol. 140. Iss. 1—3. P. 326—331.
22. Zaitsev A.A., Sidorenko D.A., Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Andreev V.A., Rupasov S.I., Sevast'yanov P.V. Diamond tools in metal bonds dispersion-strengthened with nanosized particles for cutting highly reinforced concrete. *J. Superhard Mater.* 2010. Vol. 32. No. 6. P. 423—431.
23. Loginov P., Mishnaevsky Jr.L., Levashov E., Petrzhik M. Diamond and cBN hybrid and nanomodified cutting tools with enhanced performance: Development, testing and modeling. *Mater. Design.* 2015. Vol. 88. P. 310—319.
24. Tillmann W., Ferreira M., Steffen A., Rüster K., Möller J., Bieder S., Paulus M., Tolan M. Carbon reactivity of binder metals in diamond—metal composites — characterization by scanning electron microscopy and X-ray diffraction. *Diamond Relat. Mater.* 2013. Vol. 38. P. 118—123.
25. De Oliveira L.J., Cabral S.C., Filgueira M. Study hot pressed Fe-diamond composites graphitization. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2012. Vol. 35. P. 228—234.
26. Werninghaus T., Hahn J., Richter F., Zahn D.R.T. Raman spectroscopy investigation of size effects in cubic boron nitride. *Appl. Phys. Lett.* 1997. Vol. 70. P. 958—960.
27. Sachdev H. Influence of impurities on the morphology and Raman spectra of cubic boron nitride. *Diamond Relat. Mater.* 2003. Vol. 12. Iss. 8. P. 1275—1286.
28. Kutsay O., Yan C., Chong Y.M., Ye Q., Bello I., Zhang W.J., Zapfen J.A., Zhou Z.F., Li Y.K., Garashchenko V., Gontar A.G., Novikov N.V., Lee S.T. Studying cubic boron nitride by Raman and infrared spectroscopies. *Diamond Relat. Mater.* 2010. Vol. 19. Iss. 7—9. P. 968—971.
29. Mermoux M., Jomard F., Tavarès C., Omnès F., Bustarret E. Raman characterization of boron-doped {111} homoepitaxial diamond layers. *Diamond Relat. Mater.* 2006. Vol. 15. Iss. 4—8. P. 572—576.
30. Panov V.S., Chuvilin A.M. Tekhnologiya i svoistva spetschennykh tverdykh splavov i izdelii iz nikh [Technology and properties of sintered hard alloys and their products]. Moscow: MISIS, 2001.
31. Itoh H., Matsudaira T., Naka S., Hamamoto H., Obayashi M. Formation process of tungsten borides by solid state reaction between tungsten and amorphous boron. *J. Mater. Sci.* 1987. Vol. 22. P. 2811—2815.