

высокую температуру в АД, аналогичную получаемой с применением традиционных способов нагрева переменным (50 Гц) или постоянным током.

*Наведено результати калібровки температури в апараті високого тиску «Торойд–30» при його нагріванні з застосуванням імпульсного струму. Показана можливість використання джерела живлення інверторного типу для створення високої температури в апаратах високого тиску.*

**Ключові слова:** імпульсний нагрів, інвертор, апарат високого тиску.

#### **APPLICATION OF PULSE CURRENT HIGH FREQUENCY FOR HEATING OF APPARATUS OF HIGH PRESSURE «TOROID-30»**

*The results of the temperature calibration in the high pressure apparatus "Toroid-30" at its heating with application of a pulsed current are considered. The possibility of using of the inverter-type power supply for heat generation in the high pressure apparatuses is shown.*

**Key words:** pulsed heating, inverter, high pressure apparatus.

#### **Литература**

1. Masao Tokita Spark-plasma sintering (SPS) method systems and applications. Handbook of Advanced Ceramics, 2013.
2. Munir Z.A., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M. The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method // J. Mater. Sci. – 2006. – 41. – P.763–777.

*Поступила 18.07.16*

УДК 621.762.5

**Н. П. Беженар**, д-р. техн. наук<sup>1</sup>; **Я. М. Романенко**, инженер<sup>1</sup>; **С. М. Коновал**<sup>1</sup>,  
**Т. А. Гарбуз**<sup>1</sup>, **В. И. Зеленин**<sup>2</sup>, **М. А. Полешук**<sup>2</sup>, **В. А. Лукаш**<sup>1</sup>, кандидаты техн. наук;  
**Е. В. Зеленин**<sup>2</sup>, **Ю. А. Никитюк**<sup>3</sup>, инженеры

<sup>1</sup>Институт сверхтвердых материалов им. В. М. Бакуля НАН Украины, г. Киев

<sup>2</sup>Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, г. Киев

<sup>3</sup>ООО «Научно-производственная фирма «ВИСП», г. Киев

#### **КИБОРИТ: НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НОВЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ**

*Представлены основные характеристики разработанных в ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины группы поликристаллических сверхтвердых материалов на основе КНБ марок Киборит-1 - Киборит-6. Показано успешное применение материала Киборит-2 в новой области – сварке трением с перемешиванием на примере наплавки никеля на медную плиту.*

**Ключевые слова:** инструментальные PCBN материалы, киборит, спекание, высокие давления, физико-механические свойства, сварка трением с перемешиванием, наплавка.

Поликристаллические сверхтвердые материалы на основе cBN известны на мировом рынке как инструментальные PCBN материалы. Кубический нитрид бора – алмазоподобная модификация BN, термодинамически стабильная при высоком давлении фаза с кристаллической структурой сфалерита. Технологии получения PCBN, связаны с использованием техники высоких давлений (до 8 ГПа) и высоких температур (до 2300 К), и соответствующих аппаратов высокого давления (АВД). Основная область применения –

режущий инструмент для черновой, получистовой и чистовой обработки закаленных углеродистых и высоколегированных сталей, высокопрочных и износостойких чугунов, высокотвердых наплавленных и напыленных покрытий, жаропрочных сплавов.

Требования к свойствам PCBN: высокие твердость и трещиностойкость для черновых операций металлообработки, где большие нагрузки на лезвие режущего инструмента, механизм износа преимущественно абразивный; высокая химическая стойкость для чистовых операций металлообработки, где нагрузки на лезвие режущего инструмента небольшие, а скорости резания (и температура в зоне резания) высокие, механизм износа преимущественно трибохимический. В первом случае в составе материала более 80 % cBN, твердость обеспечивает каркас cBN, высокая трещиностойкость благодаря связующему по границах зерен. Более высокая твердость у материалов с количеством cBN в структуре более 95 %, примером такого материала является разработанный в ИСМ НАН Украины материал «Киборит-1». Особенность структуры – отсутствие непрерывного каркаса связки (состав связки AlN и AlB<sub>12</sub>, количество - 3 % по массе, расположена в виде включений по границах зерен) [1]. В табл. 1 приведены свойства материала «Киборит-1». Условия получения материала – давление 7,7 ГПа, температура 2300 К. Для получения используются твердосплавные АД типа «тороид». Материал «Киборит-2» – PCBN композит со связкой, образующей непрерывный каркас наряду с каркасом из cBN. Материал получают методом предварительной пропитки алюминием сжатого порошка cBN с последующим реакционным спеканием при высоком давлении [1, 2].

Таблица 1. Характеристики киборита

Характеристики	Киборит-1	Киборит-2	Киборит-3	Киборит-4	Киборит-5	Киборит-6
Количество cBN, %	96–97	84	65–70	70–75	70–75	65–70
Температура (К) и давление (ГПа) спекания	2100–2300 7,0–8,0	1600 – 1750 4,0–4,5	1600 – 1750 4,0–4,5	1600 – 1750 4,0–4,5	1600 – 1750 4,0–4,5	1600 – 1750 4,0–4,5
Размер зерен cBN, мкм	3–14	30	3 –7	3 –7	3 –7	3 –7
Состав связующего	AlN, AlB <sub>12</sub>	AlN, AlB <sub>2</sub>	TiC, AlN, AlB <sub>2</sub>	TiB <sub>2</sub> , AlN	TiN, AlN, TiB <sub>2</sub>	ZrN, AlN, ZrB <sub>2</sub>
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,42–3,45	3,36–3,38	3,64–3,66	3,45–3,47	3,63–3,65	3,75–3,77
Твердость, ГПа	32–36	28–30	26–28	31–33	27–29	25–27
Трещиностойкость, МПа·м <sup>1/2</sup>	9–12	10–13	7–9	6–8	8–10	8–10
Теплопроводность, Вт/(м·К)	150	90	70	–	–	–
Диаметр, мм	6,3–12,7	9,5–32	9,5–32	9,5–32	9,5–32	9,5–32
Высота, мм	3,2	3,2–14*	3,2–14	3,2–14	3,2–14	3,2–14

Параметры спекания материала «Киборит-2» составляют 1600–1750 К по температуре и до 4,5 ГПа по давлению, при этом стоит отметить дополнительное выделение энергии химической реакции в рабочем объеме наряду с энергией внешнего нагрева. Для такого процесса лучшими являются стальные АД [3], одним из преимуществ которых – большой рабочий объем, что позволяет получать образцы значительных размеров (до 32 мм в

диаметре и 15 мм по высоте на прессах усилием 20 МН) с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами (см. табл. 1).

«Киборит-3» изначально разрабатывался как конструкционный материал для замены твердосплавных пуансонов в кубических и тетраэдрических АД. По своим физико-механическим свойствам материал близок к «Кибориту-2», но в отличие от последнего, электропроводен, что позволяет осуществлять порезку композита электроискровым методом (для неэлектропроводных «Киборита-1» и «Киборита-2» порезка осуществляется лазером). Материалы «Киборит-2» и «Киборит-3» в качестве конструкционных элементов аппаратов высокого давления показали значительное (в 25 раз) увеличение срока службы и достижение более высоких (до 40 ГПа) давлений по сравнению с твердосплавными.

Для финишных операций точения эффективны PCBN композиты со связкой TiN, TiC, TiCN, TiB<sub>2</sub>, ZrN, содержание cBN в них 45 - 80 %. Важным для таких композитов является однородность структуры и размер зерен cBN (до 5 мкм). При этом связка на основе тугоплавкого нитрида (карбида, борида) образует непрерывный каркас, для cBN непрерывный каркас необязательный, а иногда и нежелательный. Такие PCBN композиты будут иметь более низкие физико-механические свойства (из-за меньшего количества сверхтвердой фазы в составе, см. табл. 1), однако наличие химически инертной связки будет защищать каркас (зерна) cBN, и, соответственно, весь композит от трибохимического износа.

Однородность структуры можно обеспечить либо предварительной подготовкой порошков (нанесение на них нитридов, карбидов, металлов физическими и химическими методами), либо путем смешивания с использованием в шихте наряду с тугоплавкими соединениями алюминия. Как показали наши исследования, в первом случае параметры спекания определяются температурой плавления тугоплавких соединений (TiN, TiC, TiB<sub>2</sub>, ZrN) и близкие за значением до температуры спекания cBN (2100-2300 К), при этом необходимо использовать твердосплавные АД. Во втором случае использование предварительной пропитки под давлением шихты жидким алюминием решает проблему снижения параметров спекания до 1600 – 1750 К и соответственно возможности использовать стальные АД, и частично решает проблему однородности композита. Таким способом в ИСМ НАН Украины получены PCBN композиты систем cBN-Al-тугоплавкое соединение (киборит-3, -4, -5, -6, см. табл. 1). Структурообразование таких композитов рассмотрено в [4-6]. Использование в шихте одновременно порошков cBN с покрытием и алюминия позволяет получать при температурах до 1750 К в стальных АД композиты, однородные на уровне размера зерен cBN, и стойкие до трибохимического износа. Некоторые изделия из «Киборита» представлены на рис.1.



Рис. 1. Изделия из киборита

Новое применение киборита - рабочий инструмент для сварки трением с перемешиванием (СТП). Суть метода СТП достаточно проста: соединение металлических изделий осуществляется путем перемешивания свариваемых кромок деталей специальным



Рис. 2. Инструмент и принцип СТП

вращающимся и перемещающимся вдоль стыка инструментом, внедренным вглубь металла [7]. Схематически процесс СТП показан на рис. 2. Специальный вращающийся инструмент состоит из утолщенной части (бурта) и выступающего штыря (пина). При сварке пин входит в заготовки, а бурт прижимается к поверхности. Трение от вращения инструмента создает тепло, которое доводит соединяемые материалы до пластического состояния. Основной функцией пина является взаимное перемешивание материала, а бурта – создание избыточного давления и пластической деформации соединяемых материалов в зоне контакта.

Одна из главных проблем, связанных со сваркой жаропрочных материалов посредством трения с перемешиванием, заключается в правильном выборе материала инструмента, для изготовления которого обычно использовались тугоплавкие металлы или керамические материалы – беспримесный вольфрам, карбид вольфрама, сплав вольфрама с рением. Применение PCBN материалов за счет их уникальных физико-механических характеристик позволяет достичь более производительных режимов работы, а иногда они оказываются единственными материалами, способными выдержать столь высокие нагрузки и температуры (табл. 2).

Таблица 2. Используемые материалы для СТП [8]

Свариваемый материал	Толщина, мм	Материал инструмента
Алюминиевые сплавы	<12	Инструментальные стали, твердые сплавы системы WC-Co
	>12	Сплавы на кобальто-никелевой основах (MP 159)
Медь и медные сплавы	<50	Никелевые сплавы, кубический нитрид бора (cBN), вольфрамовые сплавы
Титановые сплавы	<6	Вольфрамовые, вольфрам-рениевые сплавы
Нержавеющие стали	<6	cBN, вольфрамовые сплавы
Низкоуглеродистые стали	<12	твердые сплавы системы WC – Co, cBN
Никелевые сплавы	<6	cBN

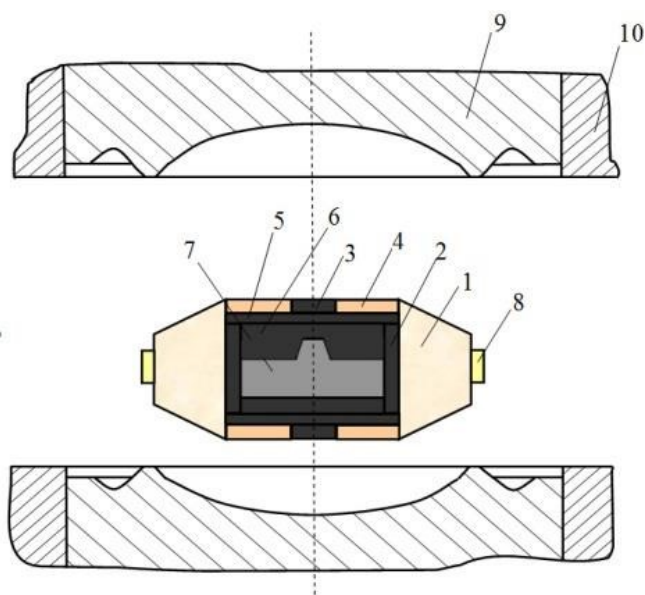


Рис. 3. Общий вид АВТ типа наковальня с углублением: 1 – контейнер с литографского камня; 2 – трубчатый прессованный нагреватель; 3 – торцевой нагреватель; 4 – шайба с литографского камня; 5, 6 – прессованные диски из графита; 7 – шихта для спекания на основе КНБ; 8 – муфта из полихлорвинила; 9 – вставка блок-матрицы из инструментальной стали; 10 – блок скрепляющих колец

также к нанесению винтовой нарезки на поверхность пина и прижимной части бурта. Внешний вид инструмента для СТП из «Киборита-2» заключенного в державку показан на рис. 4.



Рис. 4. Инструмент для СТП из «Киборита-2»

кристаллизаторов непрерывной разливки стали (МНЛЗ) в металлургии в среднем не превышает 150–350 плавков.

Рабочий инструмент для СТП изготавливался из «Киборита-2». Данный материал выбран благодаря лучшему сочетанию твердости, вязкости разрушения, теплопроводности и требованиями к геометрическим размерам инструмента.

Для получения заготовок была модифицирована ячейка высокого давления, в которой производится спекание порошковой смеси сVN и Al, таким образом, чтобы последующую механическую обработку детали свести к минимуму. Форма ячейки высокого давления показана на рис. 3.

Форма и размеры инструментов из киборита для СТП были разработаны на основе большого количества экспериментов, проводимых совместно ИСМ, ИЭС и НПФ «ВИСП» при наплавке медных плит. Соотношение размеров, частей инструмента, углы и конусность были выбраны, основываясь на практическом опыте и тепловых расчетах [9]. Механическая обработка полученной заготовки сводилась к доводке торцевой и боковой поверхности (кругление и плоское шлифование), а

Испытания инструмента для СТП из «Киборита-2» проводили на НПФ «ВИСП» при восстановлении медных плит охлаждения кристаллизаторов непрерывного литья заготовок и (или) нанесении на поверхность медных плит никелевого покрытия.

В настоящее время стойкость медных плит

Во время движения слитка через медный кристаллизатор, в зоне взаимодействия его поверхности со стенками из меди идет значительный абразивный износ меди, неравномерный по всей поверхности всей плиты. Кристаллизатор изменяет свою геометрию,



Рис. 5. Установка для наплавки и ремонта медных плит кристаллизаторов МНЛЗ

выходит из строя, что приводит к значительным материальным потерям. Обычными методами сварки и наплавки плавлением восстановить медные плиты кристаллизаторов затруднительно. Медь при плавлении быстро окисляется, нарушается ее теплопроводность, что недопустимо для охлаждения. Кроме этого возникают значительные коробления деталей и образование трещин. Применение наплавки трением с перемешиванием позволяет восстанавливать медные плиты кристаллизаторов без изменения их

теплофизических свойств и с меньшим короблением. На рис. 5 показана установка для наплавки и ремонта медных плит кристаллизаторов МНЛЗ, собранная на предприятии ОО «НПФ ВИСП».

При исследовании образцов меди, наплавленных методом СТП был установлен характер микроструктуры и определены основные свойства наплавленного слоя (рис. 6). Как видно из рис. 6, было получено качественное соединение с отсутствием дефектов в виде пор, трещин, несплошностей. Медь наносили параллельными швами на рабочий образец медного кристаллизатора МНЛЗ.



Рис. 6. Макроструктура наплавки меди марки М1 кристаллизатора МНЛЗ, полученной методом СТП  $\times 10$

Одним из основных моментов работы является подготовка изношенных плит под наплавку. Характерным дефектом, по которым кристаллизаторы часто снимаются с эксплуатации, является точечные дефекты и износ боковин нижней части охлаждающих плит глубиной более 2,7 мм [9]. Видимая зона износа располагается клинообразно по бокам плиты с расширением к нижней кромке. Наличие таких дефектов приводит к недопустимости дальнейшей эксплуатации кристаллизаторов.

Наплавка (НТП) медных плит при ремонте проходит в твердой фазе, что снижает попадание в наплавляемый металл различных добавок, не ухудшая его теплопроводности. Поскольку процесс НТП при температуре рекристаллизации меди осуществляется без перегрева, в сварочном шве возникают значительно меньшие напряжения, что позволяет успешно наплавить плиту медью с минимальным короблением.

Наплавку и ремонт плит для Новолипецкого металлургического комбината осуществлялся следующим образом. На плиту или ремонтируемый участок медной плиты, предварительно отфрезерованный до определенного уровня, накладывали пластину требуемого состава меди и формы, и надежно закрепляли струбцинами. Затем вращающийся цилиндрический инструмент с выступающим штырем внедряли в наплавляемую пластину, создавая перемешивание наплавляемого металла с металлом основы. При этом замеры температуры наплавки показали, что она незначительно превышает 850°C. Наплавка меди осуществлялась путем выполнения швов с перекрытием. Ввод инструмента происходит на неизношенной части плиты, а выход – за ее пределами на специальный носок, который затем обрезался.

Нанесение медного покрытия толщиной 4 мм на медные плиты МНЛЗ НЛМК методом наплавки трением с перемешиванием проводили на следующих режимах: обороты в минуту – 900-1100; скорость (подача) мм в мин. – от 20 до 110; угол наклона инструмента в градусах – 2,50; инструмент – киборит (сBN), диаметр заплечика 25 мм, штырь 5 мм; шаг в мм – 15; охлаждение плиты – проточное, вода; охлаждение инструмента – воздух, вода (опрыскивание), лед; размещение кристаллизатора – на стальной подкладочной плите. После ремонта и выравнивания поверхности, приступали к восстановлению толщины рабочей поверхности медной плиты. В результате использования проточного водяного охлаждения удалось снизить уровень деформаций (поводок) и избежать трещин.

Снижение потерь меди и увеличения срока службы медных плит кристаллизаторов МНЛЗ в процессе непрерывной разливки стали достигается также за счет применения защитных покрытий. За рубежом основные поставщики медных плит кристаллизаторов – фирмы Японии и Германии изготавливают их с гальваническими покрытиями из Ni и NiCo. Интенсивно разрабатывается возможность использования для этих целей сплавов на основе Ni, Cr, Fe.

Технология гальванического нанесения сплавов на основе Ni-Co очень сложная и дорогая. Нанесение же покрытий газотермическим способом не имеет распространения из-за низкого сцепления и недостаточной плотности. В связи с вышеуказанным, в ИЭС им. Е.О. Патона опробован способ нанесения на поверхности плит никелевого покрытия методом наплавки трением с перемешиванием НТП.

Нанесение 3 мм слоя никеля Н1 методом НТП на рабочие поверхности медных плит кристаллизаторов было последним и заключительным этапом их ремонта и восстановления. Для нанесения на медную плиту никеля, имеющего более высокую температуру плавления по сравнению с медью, понадобилось использовать не только другие материалы, но и изменить конструкцию инструмента. При проведении исследований процесса НТП авторами были разработаны технологические приемы НТП никеля на медные пластины. Схема процесса наплавки такая же как для меди, и описана выше.

Сравнение производственных затрат при использовании НТП и наплавки плавящимся электродом (НПЭ) показало, что начальные капиталовложения при НТП более высокие, но с увеличением объемов производства применение НТП становится экономически выгоднее, чем другой вид наплавки, а в некоторых случаях наплавка НТП единственная возможность, как например, для меди.

В качестве промышленного оборудования для восстановления кристаллизаторов непрерывной разливки стали можно использовать любой фрезерный станок. Более эффективна - специально сконструированная установка УНТП-002 (табл. 3) для наплавки медных плит методом НТП.

Таблица 3. Технические характеристики установки УНТП-002

Мощность головного привода, кВт	30	
Толщина наплавляемого слоя меди, мм, не более	10	
Частота вращения инструмента, мин <sup>-1</sup> , в пределах	500–3500	
Усилие, воспринимаемое шпинделем, кг;	осевое	5000
	радиальное	2000
Скорость перемещения инструмента при наплавке 5 мм листа, мм	200	
Ширина захвата при наплавке (5 мм листа), мм, не более	10	
Производительность по наплавляемому металлу составляет, кг, в пределах	5–10	

Лучшие результаты при наплавке слоя никеля на медные плиты показали инструменты, изготовленные из киборита, с пином конусной формы, так как в этом случае изгибающие нагрузки передаются по касательной на основное тело инструмента, что очень важно при использовании инструмента повышенной хрупкости.

Нанесение никеля проводили на установке для наплавки медных плит (рис. 7). Для уменьшения окисления материала инструмента в процессе работы использовался охлаждающий обдув его инертными газами.



Рис. 7. Процесс нанесения 3 мм слоя никеля на медную плиту МНЛЗ методом НТП



Рис. 8. Общий вид медной плиты с нанесенным никелевым покрытием после шлифовки

После нанесения никеля поверхность плиты МНЛЗ шлифуется (рис. 8).

### Выводы

1. Разработаны новые поликристаллические сверхтвердые материалы на основе cBN – Киборит-4, Киборит-5, Киборит-6, основное отличие которых от ранее разработанных Киборит-1 и Киборит-2 – связка на основе тугоплавких соединений титана и циркония,



количество cBN в связке меньше 70 %, основная область применения – чистовое точение закаленных сталей, труднообрабатываемых сплавов.

2. Расширены области применения материалов семейства «Киборит». Наряду с использованием в режущем инструменте и в конструкционных изделиях, киборит эффективен при использовании в инструменте для сварки трением с перемешиванием.

3. Рабочий инструмент для СТП изготавливался из «Киборита-2». Данный материал выбран благодаря лучшему сочетанию твердости, вязкости разрушения, теплопроводности и требованиями к геометрическим размерам инструмента.

4. С использованием инструмента из «Киборита-2» разработаны технологические приемы наплавки меди и никеля на медные пластины большой толщины методом НТП.

5. Разработана и апробирована опытная технология нанесения никелевого покрытия на медные плиты МНЛЗ методом НТП.

*Представлені основні характеристики розроблених в ІНМ Ім. В. М. Бакуля НАН України групи полікристалічних надтвердих матеріалів на основі КНБ марок Киборит-1 – Киборит-6. Показано успішне застосування матеріалу Киборит-2 в новій області – зварці тертям з перемішуванням, на прикладі наплавки нікелю на мідну плиту.*

**Ключові слова:** інструментальні PCBN матеріали, киборит, спікання, високі тиски, фізико-механічні властивості, зварка тертям з перемішуванням, наплавка.

#### **KIBORIT: NEW MATERIALS AND NEW APPLICATIONS**

*The main characteristics group of polycrystalline superhard materials cBN grades Kiborit-1 – Kiborit-6 in the V. N. Bakul ISM NAS Ukraine has been developed. Successful application Kiborit-2 material in a new area - for example friction welding, surfacing of nickel on a copper plate has been considered.*

**Keywords:** PCBN tools materials, Kiborit, sintering, high pressure, physical and mechanical properties, surfacing, friction welding.

#### **Литература**

1. Киборит: получение, структура, свойства, применение / Н. В. Новиков, А. А. Шульженко, Н. П. Беженар и др. // Сверхтвердые материалы. – 2001. – № 2. – С. 40–51.
2. Пат. 25281А, Україна, МКИ С04В35/5831. Спосіб спікання композиційного матеріалу на основі кубічного нітриду бору / М.В. Новіков, О.О. Шульженко, М.П. Беженар, С.А. Божко. – Заявл. 21.07.97, Опубл. 25.12.98, Бюл. № 6.
3. Новиков Н. В., Прихна А. И., Шульженко А. А., Боримский А. И. Развитие технологии синтеза сверхтвердых материалов при высоких статических давлениях // Сверхтвердые материалы. – 1979. – № 1. – С. 5–8.
4. Структура композитів системи cBN–Al–ZrN, отриманих спіканням при високому тиску / М. П. Беженар, Г. С. Олейник, С. А. Божко и др. // Сверхтвердые материалы. – 2009. – № 6. – С. 3–8.
5. Спекание при высоких давлениях порошков cBN с добавками тугоплавких соединений / Н. П. Беженар, С. А. Божко, Т. А. Гарбуз и др. // Физика и техника высоких давлений. – 2007. – 17. – № 2. – С. 86–95.
6. Фазовый состав и структура композитов cBN—TiB<sub>2</sub>—Al, полученных спеканием при высоком давлении / Н. П. Беженар, С. А. Божко, Т. А. Гарбуз и др. // Физика и техника высоких давлений. – 2009. – 19. – № 1. – С. 102–115.

7. Пат. 5460317 США, МКИ В23К 20/12 ; В29С 65/06 (20060101). Friction welding Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C. / W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham et al. – Заявл. 01.08.94, Оpubл. 24.10.95.
8. Бойцов А. Г., Качко В. В., Курицын Д. Н. Сварка трением перемешиванием – эффективное соединение конструкций различной геометрии. // РИТМ (Ремонт, Инновации, Технологии, Модернизация). – 2013. – № 10 (88). – С. 38.
9. Технология ремонта медных слябовых кристаллизаторов наплавкой трением с перемешиванием / Ю. Н. Никитюк, В. И. Зеленин, Е. В. Зеленин и др. //Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сборник научных трудов. — Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, 2013. – Вып. 16. – С. 520–523.

Поступила 11.07.16

УДК 536.421.1:620.187:661.057.5

**І. А. Петруша**, д-р техн. наук<sup>1</sup>; **Ю. О. Мельнійчук**<sup>1</sup>, **В. М. Бушля**<sup>2</sup>, кандидати технічних наук; **Н.М. Білявина**, канд. фіз.-мат. наук<sup>3</sup>, **О. С. Осіпов**<sup>1</sup>, **Д. А. Стратійчук**<sup>1</sup>, **Т. І. Смірнова**<sup>1</sup>, кандидати технічних наук; **К. В. Сліпченко**, асп.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ

<sup>2</sup>Лундський університет, м. Лунд, Швеція

<sup>3</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна

## ТЕРМОБАРИЧНЕ СПІКАННЯ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ В ПРИСУТНОСТІ НЕСТІЙКИХ НІТРИДІВ НА ОСНОВІ ХРОМУ ТА ЗАЛІЗА

При тиску  $\sim 8$  ГПа та температурі 1700–2300 °С досліджено спікання кубічного нітриду бору з добавками нестійких нітридів заліза ( $\sim 11,9$  об.%) та хрому ( $\sim 7,6$  об. %) порівняно з добавкою стійкішого  $Si_3N_4$  (5 об.%) та чистим cBN. Для трьох останніх випадків кінетика ущільнення відповідає топохімічному рівнянню Аврамі – Єрофєєва. За температурними залежностями констант швидкості спікання для cBN, cBN- $Si_3N_4$  та cBN- $CrN_x$  визначено енергію активації процесів, які становлять відповідно  $120 \pm 15$ ,  $77 \pm 2$  та  $64 \pm 4$  кДж/моль. Передбачається, що активування процесу зумовлюється частковою дисоціацією нітридних добавок.

**Ключові слова:** кубічний нітрид бору, добавка, нітрид кремнію, нітрид хрому, нітрид заліза, тиск, спікання, енергія активації.

### Вступ

Найчастіше продуктивність металооброблення значно підвищується при використанні різального інструменту на основі надтвердих композитів з керамічною матрицею (КМК, СМС). Композити групи *BL*, що відповідно до ISO 513:2004 (E) містять 45–65 об.% кубічного нітриду бору (cBN) у керамічній матриці, найефективніші в умовах високошвидкісного чистового точіння загартованих сталей і жароміцних сплавів з огляду на невисоку міцність, твердість та тріщиностійкість за високих трибохімічних властивостей [1–5]. Найширше застосовують високотемпературні бориди, карбіди, карбонітриди та нітриди,