



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.762:621.921.34

В.Т. СЕНЮТЬ, канд. техн. наук

ведущий научный сотрудник лаборатории наноструктурных и сверхтвердых материалов¹

E-mail: vsenyut@tut.by

А.М. ПАРНИЦКИЙ, канд. техн. наук

старший научный сотрудник лаборатории наноструктурных и сверхтвердых материалов¹

E-mail: euoracorp@tut.by

В.И. ЖОРНИК, д-р техн. наук, проф.

начальник отделения технологий машиностроения и металлургии — заведующий лабораторией наноструктурных и сверхтвердых материалов¹

E-mail: zhornik@inmash.basnet.by

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 29.08.2022.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СВЕРХТВЕРДОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА ИЗ МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛЮМИНИЕМ ВЮРЦИТНОГО НИТРИДА БОРА

Разработана математическая модель технологического процесса синтеза в условиях высоких давлений P и температур T поликристаллического сверхтвердого материала на основе кубического нитрида бора (cBN). Сверхтвердый материал получен из порошка вюрцитного нитрида бора (wBN), модифицированного алюминием Al , являющимся инициатором процесса фазового превращения $wBN \rightarrow cBN$. В результате моделирования рассчитаны граничные параметры P и T синтеза сверхтвердого материала и необходимое количество добавки Al . Установлено, что синтез материала с твердостью на уровне 28–30 ГПа и трещиностойкостью в пределах 7–10 МПа·м^{1/2} необходимо осуществлять в диапазоне давлений 5–7 ГПа при температурах 2100–2250 °С, а содержание добавки Al должно составлять 7,5–10,0 масс.%.

Ключевые слова: математическая модель, кубический нитрид бора, вюрцитный нитрид бора, модифицирование, синтез

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-4-61-46-52>

Введение. Синтез поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) на основе cBN с заданными структурно-фазовым составом и физико-механическими характеристиками является важной задачей инструментального производства. Известно, что ПСТМ из cBN ($PcBN$), как правило, получают либо спеканием порошков cBN и композиций на их основе, либо за счет фазового превращения графитоподобного нит-

рида бора (hBN) или wBN в cBN в условиях высоких P и T [1].

$PcBN$ из wBN , известные под марками «гексанит-Р» (композит-10), «ПТНБ» (композит-09), «вюрцин», «вюрбон», получают методом горячего прессования порошка wBN в условиях высоких P и T , при которых происходит частичное или полное превращение wBN в cBN . Отличительной особенностью таких ПСТМ является их мелкозер-

нистая (нанодисперсная) структура, дающая возможность эксплуатировать данный материал при значительных ударных нагрузках [2].

На физико-механические свойства PcBN влияет структура материала, которая определяется механизмами фазового превращения wBN → cBN, зависящими, в свою очередь, от параметров термобарической обработки [3]. На режимы фазового превращения может влиять и использование различных активирующих добавок. Известно, что применение добавок cBN, B, TiB₂ может способствовать как незначительному снижению *T* фазового превращения wBN в cBN при заданном давлении, так и приводить к повышению *P* и *T* превращения [4].

Повысить эффективность превращения wBN → cBN в процессе спекания под давлением позволяет прокатка исходных порошков wBN [5], введение в реакционную шихту ультрадисперсных порошков алмаза [6], а также механоактивация wBN, в т. ч. с добавками наноалмазов [7].

В [8] было показано, что предварительное химико-термическое модифицирование порошков hBN или wBN алюминием способствует более значительному снижению параметров фазового превращения указанных стадий в cBN и формированию поликристаллического материала на его основе с высоким уровнем микротвердости и трещиностойкости.

Поскольку PcBN получают с использованием дорогостоящей оснастки при экстремально высоких *P* и *T*, задача определения оптимальных параметров синтеза таких ПСТМ, обеспечивающих их минимальную себестоимость при заданном уровне эксплуатационных показателей материала, представляется актуальной.

Цель работы — разработка экспериментально-статистической модели получения PcBN из wBN, модифицированного Al в условиях высоких *P* и *T*.

Методики и исходные материалы. В качестве исходного материала для синтеза ПСТМ применяли наноструктурный порошок wBN динамического синтеза производства ПАО «Запорожский абразивный комбинат» (Украина) с размером зерен 0,1–0,3 мкм. Общее содержание нитрида бора (BN) в исходном порошке составляет 98,0–98,9 % при содержании фазы wBN в диапазоне 95,5–96,1 %.

Далее на порошок wBN химико-термическим способом наносили инициатор фазового превращения, в качестве которого был выбран Al. Для этого к навеске порошка wBN добавляли порошок алюми-

ниевой пудры по ГОСТ 5494-95 [9] в пределах концентраций 5–10 масс. %, перемешивали и осуществляли отжиг смеси в герметичном контейнере в парах галогенидов Al при *T* = 900 °С в течение 1,5–3,0 ч.

Обработку wBN после модифицирования в условиях высоких *P* и *T* проводили в аппарате высокого давления типа «наковальня с лункой» при *P* в диапазоне 4–7 ГПа и *T* до 2200 °С. В качестве среды, передающей давление, служил контейнер из литографского камня, внутри которого помещался трубчатый графитовый нагреватель с исследуемым материалом.

Микротвердость по Виккерсу и трещиностойкость исследуемых образцов измерялись на микротвердомере ПМТ-3. Измерения микротвердости осуществлялись по ГОСТ 9450-76 [10] и с нагрузкой 50–200 г. Погрешность измерений составляла ±5 %. Определение коэффициента трещиностойкости или вязкости разрушения *K_{1с}* спеченных композитов выполнены при нагрузке 200 г.

Результаты и их обсуждение. Математическую модель уравнения отклика от независимых переменных с учетом эффектов их взаимодействий и ошибки эксперимента представляем в виде полинома 2-й степени:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < l \leq k} b_{il} x_i x_l + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2,$$

где *y* — параметр оптимизации; *k* — число факторов; *i, l* — номера факторов, *i* ≠ *l*; *x_i, x_l* — варьируемые факторы; *b₀, b_i, b_{il}, b_{ii}* — коэффициенты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на параметр оптимизации.

Для создания модели процесса получения ПСТМ в виде полинома 2-й степени реализован некомпозиционный план 2-го порядка. Использование некомпозиционных планов, предусматривающих всего три уровня варьирования факторов (+1; 0; -1), упрощает и удешевляет проведение эксперимента. Некомпозиционные планы характеризуются наличием в строках матрицы планирования большого числа нулей, в результате чего существенно упрощается вычисление коэффициентов модели [11, 12].

На основе априорной информации были выбраны уровни и интервалы варьирования факторов (таблица 1).

Матрица некомпозиционного плана 2-го порядка для трех факторов представлена в таблице 2.

В соответствии с условиями опытов (см. таблицу 2) проводили термобарическое спекание модифицированного wBN и замеряли значения твердости

Таблица 1 — Уровни и интервалы варьирования факторов
Table 1 — Levels and intervals of factor variation

Факторы (параметры)	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			основной 0	верхний +1	нижний -1
Температура спекания <i>T</i> , °С	<i>x</i> ₁	250	2000	2250	1750
Давление <i>P</i> , ГПа	<i>x</i> ₂	1,5	5,5	7,0	4,0
Количество добавки порошка алюминия <i>C_{Al}</i> , масс.%	<i>x</i> ₃	2,5	7,5	10	5

Таблица 2 — Матрица планирования и результаты опытов
Table 2 — Planning matrix and results of experiments

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	Y_{HV} , ГПа	Y_{K1c} , МПа·м ^{1/2}
1	+	+	+	0	+	0	0	+	+	0	39,6	12,2
2	+	+	-	0	-	0	0	+	+	0	4,8	2,7
3	+	-	+	0	-	0	0	+	+	0	26,0	5,9
4	+	-	-	0	+	0	0	+	+	0	7,5	7,2
5	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,1	7,0
6	+	+	0	+	0	+	0	+	0	+	36,0	11,0
7	+	+	0	-	0	-	0	+	0	+	33,1	10,4
8	+	-	0	+	0	-	0	+	0	+	29,3	5,2
9	+	-	0	-	0	+	0	+	0	+	24,5	5,0
10	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,2	7,5
11	+	0	+	+	0	0	+	0	+	+	34,0	8,2
12	+	0	+	-	0	0	-	0	+	+	30,0	7,4
13	+	0	-	+	0	0	-	0	+	+	5,4	3,1
14	+	0	-	-	0	0	+	0	+	+	5,2	3,0
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,5	6,8

и коэффициента трещиностойкости. Значения Y_{HV} и Y_{K1c} , указанные в таблице 2, получены как средние из трех измерений.

По данным опытов, проведенных согласно матрице планирования, получена модель, характеризующая зависимость Y_{HV} от исследуемых факторов процесса, представляющая полином 2-й степени:

$$Y_{HV} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2. \quad (1)$$

Коэффициенты модели вычисляли по приведенным в [11] формулам:

$$b_0 = \frac{1}{3} \sum_{u=1}^3 y_{0u}; \quad b_i = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^{15} x_{ij}y_j; \quad b_{il} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{15} x_{ij}x_{lj}y_j;$$

$$b_{ii} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{16} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{6} \sum_{u=1}^3 y_{0u}.$$

После вычислений получены следующие значения коэффициентов уравнения регрессии (с округлением до двух знаков после запятой):

$$b_0 = 26,27; \quad b_1 = 3,28; \quad b_2 = 13,34; \quad b_3 = 1,49;$$

$$b_{12} = 4,08; \quad b_{13} = -0,48; \quad b_{23} = 0,95;$$

$$b_{11} = 2,64; \quad b_{22} = -9,43; \quad b_{33} = 1,82.$$

Дисперсию $s^2\{Y_{HV}\}$ параметра оптимизации определяли по результатам опытов в центре плана (см. таблицу 2, № опыта 5; 10; 15). Для вычисления дисперсии $s^2\{Y_{HV}\}$ составлена вспомогательная таблица 3.

Дисперсии, характеризующие ошибки в определении коэффициентов уравнения регрессии, вычисляли по приведенным в [11] формулам при числе факторов $k = 3$. Получены следующие значения дисперсий:

$$s^2\{b_0\} = \frac{1}{3} s^2\{Y_{HV}\} = 0,95; \quad s^2\{b_i\} = \frac{1}{8} s^2\{Y_{HV}\} = 0,36;$$

$$s^2\{b_{ij}\} = \frac{1}{4} s^2\{Y_{HV}\} = 0,71; \quad s^2\{b_{ii}\} = \frac{13}{48} s^2\{Y_{HV}\} = 0,77.$$

Для проверки значимости коэффициентов модели находим их доверительные интервалы. Доверительный интервал Δb_0 коэффициента b_0 находим по выражению

$$\Delta b_0 = \pm t_T s\{b_0\} = \pm 1,986,$$

где t_T — табличное значение критерия Стьюдента (при числе степеней свободы $f = 30$ и 5-процентном уровне значимости $t_T = 2,04$):

$$f = (n - 1) \cdot N = (3 - 1) \cdot 15 = 30,$$

где N — число опытов в матрице планирования; n — число параллельных опытов.

Аналогично определяем доверительные интервалы коэффициентов b_i, b_{ij}, b_{ii} :

$$\Delta b_i = \pm t_T s\{b_i\} = \pm 1,216;$$

$$\Delta b_{ij} = \pm t_T s\{b_{ij}\} = \pm 1,720;$$

$$\Delta b_{ii} = \pm t_T s\{b_{ii}\} = \pm 1,790.$$

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. Коэффициенты b_{13} и b_{23} меньше доверительного интервала, поэтому их можно признать статистически незначимыми и исключить из уравнения регрессии. Тогда уравнение регрессии (1) получает вид:

$$Y_{HV} = 26,27 + 3,28x_1 + 13,34x_2 + 1,49x_3 + 4,08x_1x_2 + 2,64x_1^2 - 9,43x_2^2 + 1,82x_3^2. \quad (2)$$

Таблица 3 — Вспомогательная таблица для расчета $s^2\{Y_{HV}\}$
Table 3 — Auxiliary table for calculating $s^2\{Y_{HV}\}$

№ опыта в центре плана	Y_{HV}	\bar{Y}_{HV}	$Y_{HV} - \bar{Y}_{HV}$	$(Y_{HV} - \bar{Y}_{HV})^2$
5	25,1	26,3	-1,2	1,36
10	28,2		1,9	3,74
15	25,5		-0,8	0,59
$s^2\{Y_{HV}\} = \frac{s_E}{n_0 - 1} = \frac{5,69}{3 - 1} = 2,84$				$s_E = \sum (Y_{HV} - \bar{Y}_{HV})^2 = 5,69$

Адекватность полученной модели проверяем по F -критерию Фишера. Для вычисления дисперсии адекватности $s_{ад}^2$ находим сумму квадратов отклонений s_R расчетных значений \hat{Y}_{HV} от экспериментальных Y_{HV} во всех точках плана (таблица 4). Расчетные значения \hat{Y}_{HV} определяем по выражению (2), $s_E = 5,69$ (см. таблицу 3).

Находим дисперсию:

$$s_{ад}^2 = \frac{s_R - s_E}{N - k' - (n_0 - 1)} = \frac{14,2 - 5,69}{15 - 8 - (3 - 1)} = 1,69,$$

где N — общее количество опытов; k' — количество коэффициентов аппроксимирующего полинома (количество значимых факторов); n_0 — количество опытов в центре плана.

Дисперсия $s^2\{Y_{HV}\} = 2,84$ (см. таблицу 3), поэтому расчетное значение F -критерия:

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s^2\{Y_{HV}\}} = 0,6.$$

Табличное значение F -критерия при 5-процентном уровне значимости и числах степеней свободы для большей дисперсии $m_1 = N - k' - n_0 + 1 = 5$, меньшей дисперсии $m_2 = n_0 - 1 = 2$, $F_T = 19,37$. Так как $F_p < F_T$, полученная модель (2) адекватна при 5-процентном уровне значимости.

Анализ уравнения (2) показывает, что в пределах установленных интервалов варьирования факторов увеличение фактора x_1 в большей степени влияет на увеличение показателя твердости, чем у факторов x_2 и x_3 , однако в связи с наличием квадратичных членов в уравнении (2) зависимость эта носит нелинейный характер, что наиболее сильно проявляется через фактор x_1 .

Таблица 4 — Вспомогательная таблица для вычисления s_R
Table 4 — Auxiliary table for calculating s_R

№ опыта	Y_{HV}	\hat{Y}_{HV}	$Y_{HV} - \hat{Y}_{HV}$	$(Y_{HV} - \hat{Y}_{HV})^2$
1	39,6	40,2	-0,6	0,3
2	4,8	5,3	-0,5	0,3
3	26,0	25,5	0,5	0,3
4	7,5	6,9	0,6	0,3
5	25,1	26,3	-1,2	1,4
6	36,0	35,5	0,5	0,3
7	33,1	32,5	0,6	0,3
8	29,3	28,9	0,4	0,1
9	24,5	26,0	-1,5	2,1
10	28,2	26,3	1,9	3,7
11	34,0	33,5	0,5	0,3
12	30,0	30,5	-0,5	0,3
13	5,4	6,8	-1,4	2,0
14	5,2	3,8	1,4	1,9
15	25,5	26,3	-0,8	0,6
$s_R = \sum (Y_{HV} - \hat{Y}_{HV})^2 = 14,2$				

Для удобства интерпретации полученных результатов и использования уравнения (2) для практических расчетов необходимо перейти от кодированных значений факторов (x_1, x_2, x_3) к натуральным значениям (T, P, C_{Al}). Для этого использовали следующие формулы:

$$x_1 = \frac{T - T_0}{\Delta T}; \quad x_2 = \frac{P - P_0}{\Delta P}; \quad x_3 = \frac{C_{Al} - C_{Al0}}{\Delta C_{Al}},$$

где T_0, P_0, C_{Al0} — натуральные значения факторов на основных уровнях; $\Delta T, \Delta P, \Delta C_{Al}$ — значения интервалов варьирования.

Таким образом, в соответствии с таблицей 1,

$$x_1 = \frac{T - 2000}{250}; \quad x_2 = \frac{P - 5,5}{1,5}; \quad x_3 = \frac{C_{Al} - 7,5}{2,5}.$$

С учетом перехода к натуральным значениям факторов уравнение регрессии (2) примет вид:

$$Y_{HV} = 100,49 - 0,0747 \cdot T + 0,22 \cdot P - 2 \cdot C_{Al} + 0,0027 \cdot T \cdot P - 0,000016 \cdot T^2 - 0,45 \cdot P^2 + 0,16 \cdot C_{Al}^2 \quad (3)$$

Аналогично получено уравнение регрессии для Y_{K1c} :

$$Y_{K1c} = 7,1 + 1,63x_1 + 2,21x_2 + 2,7x_1x_2 + 1,19x_1^2 - 1,29x_2^2 - 0,39x_3^2. \quad (4)$$

Полученная модель адекватна при 5-процентном уровне значимости, так как

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s^2\{Y_{K1c}\}} = 14,59 < F_T = 19,37.$$

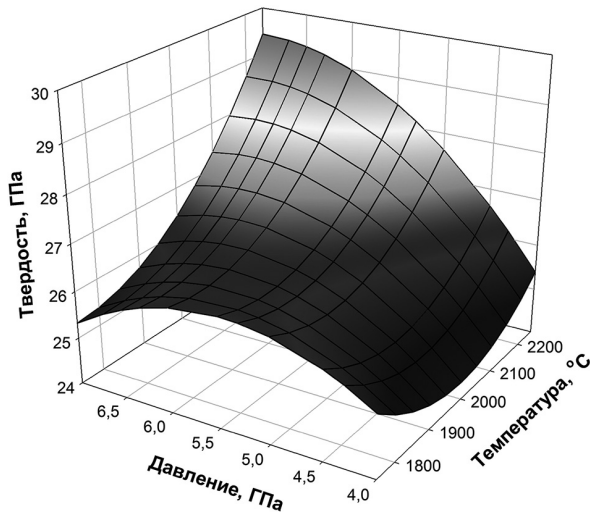
После перехода от кодированных значений факторов (x_1, x_2, x_3) к натуральным (T, P, C_{Al}) уравнение (4) примет вид:

$$Y_{K1c} = 66,32 + 0,000016 \cdot T_2 - 0,45 \cdot P_2 - 0,16 \cdot C_{Al}^2 + 0,0027 \cdot T \cdot P - 0,0747 \cdot T + 0,22 \cdot P + 2,4 \cdot C_{Al}. \quad (5)$$

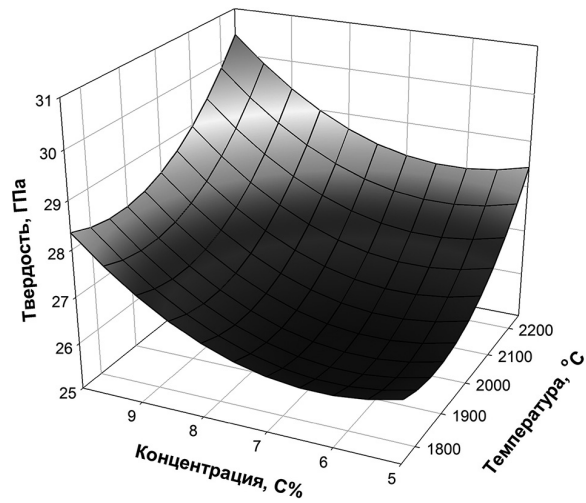
Анализ уравнения (5) показывает, что в пределах установленных интервалов варьирования увеличение фактора x_1 также в большей степени влияет на увеличение коэффициента трещиностойкости, чем факторы x_2 и x_3 , однако в связи с наличием квадратичных членов в уравнении (5) зависимость эта носит нелинейный характер, что наиболее сильно проявляется через фактор x_1 .

Уравнения регрессии (3) и (5) можно использовать для выбора технологических режимов термобарического спекания ПСТМ, обеспечивающих оптимальные значения твердости и коэффициента трещиностойкости в зависимости от исследуемых факторов (T, P, C_{Al}). На рисунках 1 и 2 представлены полученные с помощью уравнений (3) и (5) графические зависимости твердости и коэффициента трещиностойкости от исследуемых факторов. При построении поверхности откликов (программа SigmaPlot 12) варьировались только два фактора.

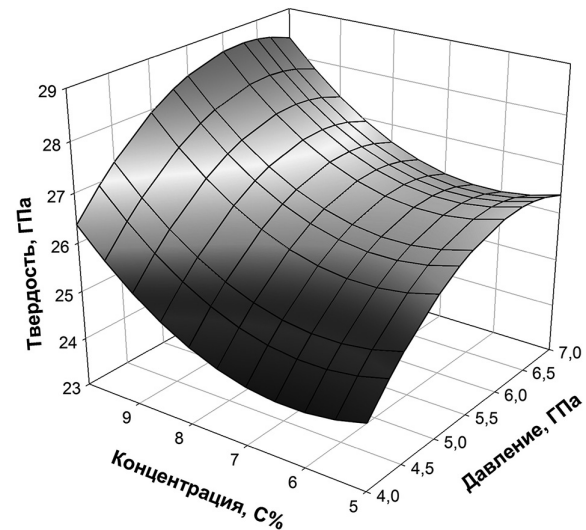
Из рисунков 1 и 2 видно, что с ростом температуры спекания T микротвердость материала повышается до определенного значения; дальнейшее



a

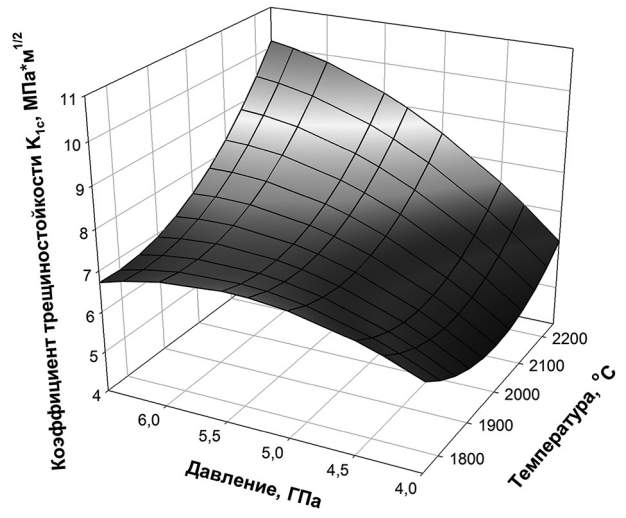


b

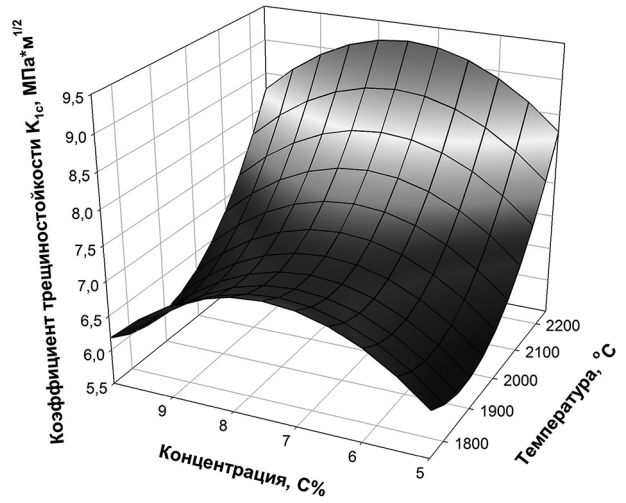


c

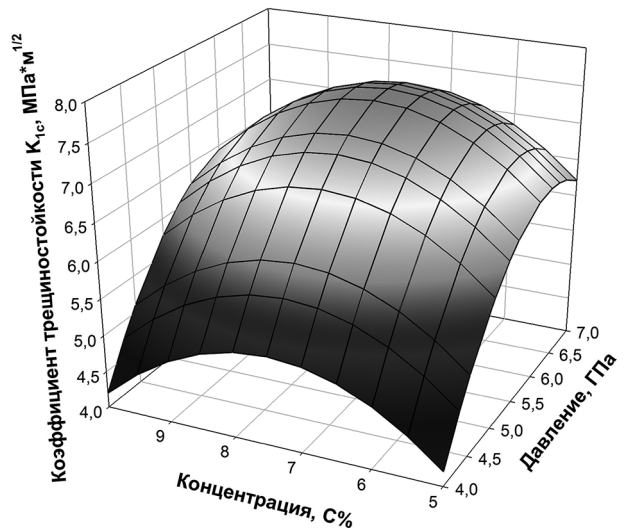
Рисунок 1 — Зависимость твердости Y_{HV} от технологических факторов (T, P, C_{Al}): a — изменение Y_{HV} от T и P ($C_{Al} = 7,5$ масс. %); b — изменение Y_{HV} от T и C_{Al} ($P = 5,5$ ГПа); c — изменение Y_{HV} от P и C_{Al} ($T = 2000$ °C)
Figure 1 — Dependence of the hardness Y_{HV} on technological factors (T, P, C_{Al}): a — variation Y_{HV} with T and P ($C_{Al} = 7.5$ wt.%); b — variation Y_{HV} with T and C_{Al} ($P = 5.5$ GPa); c — variation Y_{HV} with P and C_{Al} ($T = 2,000$ °C)



a



b



c

Рисунок 2 — Зависимость трещиностойкости Y_{K1c} от технологических факторов (T, P, C_{Al}): a — изменение Y_{K1c} от T и P ($C_{Al} = 7,5$ масс. %); b — изменение Y_{K1c} от T и C_{Al} ($P = 5,5$ ГПа); c — изменение Y_{K1c} от P и C_{Al} ($T = 2000$ °C)
Figure 2 — Dependence of crack resistance of Y_{K1c} on technological factors (T, P, C_{Al}): a — variation Y_{K1c} with T and P ($C_{Al} = 7.5$ wt.%); b — variation Y_{K1c} with T and C_{Al} ($P = 5.5$ GPa); c — variation Y_{K1c} with P and C_{Al} ($T = 2,000$ °C)

увеличение T приводит к снижению микротвердости как вследствие рекристаллизации зерен cBN, так и в результате образования в материале hBN [13]. Изменение P и концентрации добавки C_{Al} также приводят к изменению значений микротвердости, но в меньшей степени. При этом значения микротвердости материала HV достигают 28,5–30,4 ГПа при $T = 2100\text{--}2250$ °C, $P = 5,5\text{--}7,0$ ГПа и $C_{Al} = 7,5\text{--}10,0$ масс. %.

Основным фактором, определяющим величину коэффициента трещиностойкости R_{cBN} , является P , а T и C_{Al} оказывают меньшее влияние (см. рисунок 2). Значения K_{Ic} в пределах 7,5–10,3 МПа·м^{1/2} материала достигаются при $T = 2100\text{--}2250$ °C, $P = 5,5\text{--}7,0$ ГПа и $C_{Al} = 7,5\text{--}9,5$ %. Сверхтвердый материал с достигнутым уровнем свойств может быть использован для лезвийной обработки закаленных до уровня 55–64 HRC сталей [14]. Дальнейшее увеличение микротвердости и трещиностойкости R_{cBN} сопряжено с повышением давления и температуры спекания, что технически усложняет задачу получения сверхтвердого материала и увеличивает его себестоимость.

Заключение. На основании полученных результатов показано, что для синтеза R_{cBN} с микротвердостью на уровне 28,5–30,4 ГПа и коэффициентом трещиностойкости в диапазоне 7,5–10,3 МПа·м^{1/2} параметры процесса спекания в условиях высоких P и T должны находиться в следующих пределах: $P = 5,5\text{--}7,0$ ГПа, $T = 2100\text{--}2250$ °C, а количество добавки Al необходимо варьировать в диапазоне $C_{Al} = 7,5\text{--}10,0$ масс. %. Практическая проверка полученной экспериментально-статистической модели показала ее адекватность в пределах выбранных интервалов варьирования технологических параметров спекания при высоких P и T .

Список литературы

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / Г.П. Богатырева [и др.]; под ред. Н.В. Новикова. — М.: Машиностроение, 2005. — 555 с.

2. Курдюмов, А.В. Фазовые превращения в углероде и нитриде бора / А.В. Курдюмов, А.Н. Пилянкевич. — Киев: Наук. думка, 1979. — 188 с.

3. Олейник, Г.С. Структурные механизмы формирования керамики на основе вюрцитной модификации нитрида бора / Г.С. Олейник // Сверхтвердые материалы. — 1993. — № 6. — С. 3–12.

4. Akashi, T. Effect of TiB₂ and boron additions on the stability of wurtzite-type boron nitride at high temperatures and pressures / T. Akashi, A. Sawaoka, S. Saito // J. Am. Ceram. Soc. — 1978. — Vol. 61, iss. 5–6. — Pp. 245–246. — DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1978.tb09290.x>.

5. Волкогон, В.М. Влияние сдвиговых напряжений на полиморфные превращения в вюрцитном нитриде бора / В.М. Волкогон // Сверхтвердые материалы. — 2003. — № 1. — С. 22–31.

6. Особенности фазовых превращений в системе «BN_В — алмаз» в зависимости от характеристик алмаза при ее спекании в условиях высоких давлений / В.М. Волкогон [и др.] // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: материалы 17-го междунар. науч.-техн. семинара, Свалява, 20–24 февр. 2017 г. — Киев: АТМ Украины, 2017. — С. 71–73.

7. Синтез ПСТМ из механоактивированного вюрцитного нитрида бора с добавками наноалмазов / В.Т. Сенють [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 14-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9–11 сент. 2020 г. / НАН Беларуси [и др.]; редкол.: А.Ф. Ильющенко [и др.]. — Минск: Беларус. навука, 2020. — С. 423–429.

8. Сенють, В.Т. Синтез сверхтвердого материала на основе модифицированного вюрцитного нитрида бора / В.Т. Сенють // Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: материалы 19-го междунар. науч.-техн. семинара, Кошице, 18–22 февр. 2019 г. — Киев: АТМ Украины, 2019. — С. 184–188.

9. Пудра алюминиевая. Технические условия: ГОСТ 5494-95. — Взамен ГОСТ 5494-71; введ. 01.01.97. — Минск: Стандартиформ, 2006. — 12 с.

10. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников: ГОСТ 9450-76. — Взамен ГОСТ 9450-60; введ. 01.01.77. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 35 л.

11. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.

12. Хейфец, М.Л. Математическое моделирование технологических процессов / М.Л. Хейфец. — Новополоцк: ПГУ, 1999. — 104 с.

13. Голубев, А.С. Нитрид бора. Структура, свойства, получение / А.С. Голубев, А.В. Курдюмов, А.Н. Пилянкевич; АН УССР, Ин-т пробл. материаловедения. — Киев: Наук. думка, 1987. — 198 с.

14. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С.А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С.А. Чижика, М.Л. Хейфеца. — Минск: Беларус. навука, 2017. — 376 с.

SENYUT Vladimir T., Ph. D. in Eng.

Leading Researcher of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials¹

E-mail: vsenyut@tut.by

PARNITSKY Alexander M., Ph. D. in Eng.

Senior Researcher of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials¹

E-mail: europacorp@tut.by

ZHORNIK Viktor I., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department of Technologies of Mechanical Engineering and Metallurgy – Head of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials¹

E-mail: zhornik@inmash.basnet.by

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE SYNTHESIS OF A POLYCRYSTALLINE SUPERHARD MATERIAL BASED ON CUBIC BORON NITRIDE FROM WURZITE BORON NITRIDE MODIFIED WITH ALUMINUM

A mathematical model is developed for the technological process of synthesis under conditions of high pressures P and temperatures T of a polycrystalline superhard material based on cubic boron nitride (cBN). The superhard material is obtained from a wurtzite boron nitride (wBN) powder modified with aluminum Al, which is the initiator of the wBN \rightarrow cBN phase transformation process. As a result of modelling, the boundary parameters P and T of the superhard material synthesis and the required amount of aluminum addition are calculated. It has been established that the synthesis of a material with a hardness of 28–30 GPa and crack resistance in the range of 7–10 MPa·m^{1/2} is carried out in the pressure range of 5–7 GPa at temperatures of 2.100–2.250 °C, and the aluminum additive content should be 7.5–10.0 wt.%.

Keywords: mathematical model, cubic boron nitride, wurtzite boron nitride, modification, synthesis

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-4-61-46-52>

References

1. Bogatyreva G.P., et al. *Instrumenty iz sverkhverdnykh materialov* [Tools made of superhard materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 555 p. (in Russ.).
2. Kurdyumov A.V., Pilyankevich A.N. *Fazovye prevrashcheniya v uglerode i nitrade bora* [Phase transformations in carbon and boron nitride]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1979. 188 p. (in Russ.).
3. Oleynik G.S. Strukturnye mekhanizmy formirovaniya keramiki na osnove vyuritsitnoy modifikatsii nitrada bora [Structural mechanisms of ceramic formation based on wurtzite modification of boron nitride]. *Sverkhverdnye materialy*, 1993, no. 6, pp. 3–12 (in Russ.).
4. Akashi T., Sawaoka A., Saito S. Effect of TiB₂ and boron additions on the stability of wurtzite-type boron nitride at high temperatures and pressures. *Journal of the American ceramic society*, 1978, vol. 61, iss. 5–6, pp. 245–246. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1978.tb09290.x>.
5. Volkogon V.M. Vliyaniye sdvigoverykh napryazheniy na polimorfnyye prevrashcheniya v vyuritsitnom nitrade bora [Effect of shear stresses on polymorphic transformations in wurtzite boron nitride]. *Sverkhverdnye materialy*, 2003, no. 1, pp. 22–31 (in Russ.).
6. Volkogon V.M., et al. Osobennosti fazovykh prevrashcheniy v sisteme “BN_v–almaz” v zavisimosti ot kharakteristik almaza pri ee spekanii v usloviyakh vysokikh davleniy [Features of phase transformations in the “BN_v–diamond” system depending on the characteristics of the diamond during its sintering under high pressure conditions]. *Materialy 17 Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminar “Sovremennyye problemy proizvodstva i remonta v promyshlennosti i na transporte”* [Proc. 17th International scientific and technical seminar “Modern problems of production and repair in industry and transport”]. Kiev, 2017, pp. 71–73 (in Russ.).
7. Senyut V.T., Kovaleva S.A., Valkovich I.V., Mosunov E.I. Sintez PSTM iz mekhanoaktivirovannogo vyuritsitnogo nitrada bora s dobavkami nanoalmazov [Synthesis of polycrystalline superhard material from mechanically activated wurtzite boron nitride with nanodiamond additives]. *Materialy 14 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Novyye materialy i tekhnologii: poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnyye materialy, zashchitnyye pokrytiya, svarka”* [Proc. 14th International scientific and technical conference “New materials and technologies: powder metallurgy, composite materials, protective coatings, welding”]. Minsk, 2020, pp. 423–429 (in Russ.).
8. Senyut V.T. Sintez sverkhverdogo materiala na osnove modifitsirovannogo vyuritsitnogo nitrada bora [Synthesis of superhard material based on modified wurtzite boron nitride]. *Materialy 17 Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminar “Sovremennyye voprosy proizvodstva i remonta v promyshlennosti i na transporte”* [Proc. 17th International scientific and technical seminar “Modern issues of production and repair in industry and transport”]. Kiev, 2019, pp. 184–188 (in Russ.).
9. State Standard 5494-95. *Pudra alyuminievaya. Tekhnicheskie usloviya* [Pigmentary aluminium. Specifications]. Minsk, Standartinform Publ., 2006. 12 p. (in Russ.).
10. State Standard 9450-76. *Izmereniye mikrotverdosti vdavlivaniem almaznykh nakonechnikov* [Measurements microhardness by diamond instruments indentation]. Moscow, Standartov Publ., 1996. 35 p. (in Russ.).
11. Spiridonov A.A. *Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Planning of an experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p. (in Russ.).
12. Kheifetz M.L. *Matematicheskoye modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov* [Mathematical modelling of technological processes]. Novopolotsk, Polotskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 1999. 104 p. (in Russ.).
13. Golubev A.S., Kurdyumov A.V., Pilyankevich A.N. *Nitrid bora. Struktura, svoystva, poluchenie* [Boron nitride. Structure, properties, production]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1987. 200 p. (in Russ.).
14. Klimenko S.A., et al. *Finishnaya obrabotka poverkhnostey pri proizvodstve detaley* [Finishing treatment of surfaces in the production of parts]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2017. 376 p. (in Russ.).