

УДК 621.762:621.921.34

А.М. ПАРНИЦКИЙмладший научный сотрудник лаборатории наноструктурных сверхтвердых материалов¹
E-mail: europacorp@tut.by**В.И. ЖОРНИК**, д-р техн. наук, доц.заместитель начальника отделения технологий машиностроения и металлургии – заведующий лабораторией наноструктурных и сверхтвердых материалов¹

E-mail: zhornik@inmash.basnet.by

В.Т. СЕНЫУТЪ, канд. техн. наукведущий научный сотрудник лаборатории наноструктурных и сверхтвердых материалов¹

E-mail: vsenyut@tut.by

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

Поступила в редакцию 28.04.2017.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СИНТЕЗА АЛМАЗНЫХ ПСТМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С использованием метода расчетно-экспериментального моделирования разработана математическая модель процесса получения поликристаллического сверхтвердого материала с улучшенными физико-механическими характеристиками, позволяющая рассчитать граничные P -, T -параметры термобарического спекания поликристаллического материала на основе модифицированных микро- и нанопорошков алмаза. На основании результатов расчетно-экспериментального моделирования установлено, что для получения оптимальной твердости и коэффициента трещиностойкости алмазного материала параметры процесса термобарического спекания должны входить в следующие диапазоны: температура спекания $T = 1900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление $P = 6,5\text{ ГПа} \pm 0,25\text{ ГПа}$, количество добавки УДА-порошка, модифицированного бором $C = 20\text{ масс.}\% \pm 2,5\text{ масс.}\%$.

Ключевые слова: математическая модель, композиционные порошки алмаза, модифицирование, наноалмазы, термобарическая обработка

Введение. В настоящее время в мире разработана целая гамма различных поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) на основе алмаза, обладающих высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками («Мегадаймонд», «Синдакс», АСПК, СВ, «Карбонит» и др. [1–3]. Однако в большинстве случаев затраты на их производство остаются достаточно высокими. Поэтому одной из важнейших задач в области технологий синтеза и спекания ПСТМ на основе нано- и микропорошков алмазов является достижение сочетания оптимальных характеристик получаемых материалов при минимальных производственных затратах, а разработка новых технологий, позволяющих снизить стоимость алмазных поликристаллов, является актуальной задачей [4–6].

Для обоснованного выбора состава шихты и технологических режимов термобарического спекания ПСТМ, а также сокращения продолжительности и объема экспериментов в работе были использованы методы математического планиро-

вания эксперимента, традиционно применяемые для оптимизации разнообразных технологических процессов [7]. Известно, что одними из основных физико-механических параметров, определяющих качество и работоспособность алмазных ПСТМ, являются их твердость и трещиностойкость [8].

В связи с этим цель работы заключалась в установлении зависимости максимальной твердости HV и трещиностойкости K_{Ic} от параметров термобарического спекания и состава материала, а также изучение структуры сверхтвердого поликристаллического материала, полученного по результатам расчетно-экспериментального моделирования. В качестве основных факторов, влияющих на качество алмазных ПСТМ, рассматривались давление P , ГПа, температура T , $^{\circ}\text{C}$ и концентрация модифицирующей добавки C , %, в качестве которой использовали УДА-порошок детонационного синтеза [8, 9].

Оборудование, методика и объекты исследования. В качестве исходных материалов использовались порошок УДА производства НП ЗАО «Син-

Таблица 1 — Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы (параметры)	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			основной 0	верхний +1	нижний -1
Температура спекания T , °C	x_1	150	1800	1950	1650
Давление P , ГПа	x_2	1,0	6,5	7,5	5,5
Количество добавки УДА-порошка C , масс. %	x_3	12,5	22,5	35	10

та» (г. Минск) с размером частиц 4–10 нм (ТУ РБ 28619110.001-95), модифицированный бором [8], и микропорошок алмазов статического синтеза АСМ 14/10 производства ЗАИ ПО «Кристалл» (г. Гомель) с размером частиц в диапазоне 0,5–20 мкм (ГОСТ 9206-80), модифицированный кремнием [10].

Модифицирующий отжиг алмазных порошков различных типов осуществляли в герметичном контейнере под плавким затвором в восстановительной атмосфере диссаммиака, содержащей хлориды соответствующих соединений в температурном интервале 800–950 °C при изотермической выдержке в течение 1–4 ч.

Термобарическую обработку шихты выполняли в аппарате высокого давления «наковальня с лункой» в диапазоне давлений 5,5–7,5 ГПа при температуре от 1650 до 1950 °C. В качестве среды, передающей давление, служил контейнер из литографического камня, внутри которого помещался трубчатый графитовый нагреватель с исследуемым материалом. Для оценки давления в камере синтеза использовали метод калибровки при комнатной температуре, основанный на сопоставлении усилия пресса и давления полиморфного превращения в реперном веществе, в качестве которых применяли V_i и PbSe . Контроль температуры проводили с помощью хромель-алюмелевой и платина-платинородиевой термопар.

Трещиностойкость и микротвердость по Виккерсу исследуемых образцов измерялись на микротвердомере ПМТ-3. Измерения микротвердости осуществлялись по ГОСТ 9450-76 при нагрузке 200 г. Погрешность измерений составляла $\pm 5\%$. Определение коэффициента трещиностойкости K_{Ic} спеченных композитов также были выполнены при нагрузке 200 г.

Обсуждение полученных результатов. Математическую модель уравнения отклика от независимых переменных, учитывающую их взаимодействия и экспериментальные ошибки, представим в виде полинома второй степени:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2,$$

где y — параметр оптимизации; k — число факторов; i, j — номера факторов, $i \neq j$; x_i, x_j — варьируемые факторы; b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} — коэффициенты регрес-

сии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на параметр оптимизации.

С целью получения модели процесса получения ПСТМ в виде полинома второй степени был разработан некомпозиционный план второго порядка. Использование некомпозиционного плана предусматривает три уровня варьирования факторов (+1, 0, -1), что существенно упрощает и удешевляет практическую реализацию достаточно трудоемких экспериментов по спеканию в условиях высоких давлений и температур. В таблице 1 представлены выбранные уровни и интервалы варьирования факторов.

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

Исходя из полученных экспериментальных данных (см. таблицу 2) проводили спекание под давлением модифицированных алмазных порошков, после чего измеряли микротвердость и коэффициент трещиностойкости полученных поликристаллов. Найденные значения Y_{HV} и $Y_{K_{Ic}}$ (см. таблицу 2) вычислены как средние из 3 измерений.

На основе проведенных в соответствии с матрицей планирования опытов получена математическая модель, характеризующая зависимость Y_{HV}

Таблица 2 — Матрица планирования и результаты опытов

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	x_{12}	x_{22}	x_{32}	Y_{HV} , ГПа	$Y_{K_{Ic}}$, МПа·м ^{1/2}
1	+	+	+	0	+	0	0	+	+	0	47,5	8,1
2	+	+	-	0	-	0	0	+	+	0	56,1	8,4
3	+	-	+	0	-	0	0	+	+	0	44,3	7,9
4	+	-	-	0	+	0	0	+	+	0	56,8	8,2
5	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58,7	8,7
6	+	+	0	+	0	+	0	+	0	+	42,5	7,5
7	+	+	0	-	0	-	0	+	0	+	53,5	7,7
8	+	-	0	+	0	-	0	+	0	+	54,1	8,0
9	+	-	0	-	0	+	0	+	0	+	51,8	8,1
10	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56,5	8,5
11	+	0	+	+	0	0	+	0	+	+	47,5	7,9
12	+	0	+	-	0	0	-	0	+	+	58,1	8,7
13	+	0	-	+	0	0	-	0	+	+	44,8	8,5
14	+	0	-	-	0	0	+	0	+	+	52,5	8,2
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	55,1	8,4

от исследуемых факторов процесса спекания под давлением:

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

По формулам, приведенным в [7], вычисляли коэффициенты модели:

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

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

В результате проведенных вычислений получены следующие значения коэффициентов уравнения регрессии:

$$b_0 = 56,77; \quad b_1 = -0,925; \quad b_2 = -1,6; \quad b_3 = -3,38;$$

$$b_{12} = -0,98; \quad b_{13} = -3,33; \quad b_{23} = -0,73; \quad b_{11} = -2,92;$$

$$b_{22} = -2,67; \quad b_{33} = -3,37.$$

По результатам опытов в центре плана (см. таблицу 2, опыты 5; 10; 15) определяли дисперсию $s^2\{Y_{HV}\}$ параметра оптимизации. Вычисление дисперсии $s^2\{Y_{HV}\}$ проводили по следующим формулам:

$$s_E = \sum (Y_{HV} - \bar{Y}_{HV})^2 = 6,59;$$

$$s^2\{Y_{HV}\} = \frac{s_E}{n_0 - 1} = \frac{6,59}{3 - 1} = 3,29.$$

По приведенным в [7] формулам при числе факторов $k = 3$ определяли дисперсии, характеризующие ошибки при вычислении коэффициентов уравнения регрессии. Получены следующие значения дисперсий:

$$s^2\{b_0\} = \frac{1}{3} s^2\{Y_{HVj}\} = 1,10; \quad s^2\{b_i\} = \frac{1}{8} s^2\{Y_{HVj}\} = 0,41;$$

$$s^2\{b_{ii}\} = \frac{1}{4} s^2\{Y_{HVj}\} = 0,82; \quad s^2\{b_{ij}\} = \frac{13}{48} s^2\{Y_{HVj}\} = 0,89.$$

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

$$\Delta b_0 = \pm t_f s\{b_0\} = \pm 2,137,$$

где t_f — табличное значение критерия Стьюдента; при числе степеней свободы f равном 30 и 5 %-м уровне значимости $t_f = 2,04$.

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

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

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

$$\Delta b_i = \pm t_f s\{b_i\} = \pm 1,309; \quad \Delta b_{ii} = \pm t_f s\{b_{ii}\} = \pm 1,851;$$

$$\Delta b_{ij} = \pm t_f s\{b_{ij}\} = \pm 1,927.$$

Найденные коэффициенты b_1, b_{12} и b_{23} меньше доверительного интервала, поэтому их можно исключить из уравнения регрессии [7]. Тогда уравнение регрессии (1) имеет следующий вид:

$$Y_{HV} = 56,77 - 1,6x_2 - 3,38x_3 - 3,33x_1x_3 - 2,92x_{12} - 2,67x_{22} - 3,37x_{32}. \quad (2)$$

Для проверки адекватности полученной модели используем F -критерий Фишера. При вычислении дисперсии $S_{ал}^2$ адекватности определяем сумму S_R квадратов отклонений расчетных значений \hat{Y}_{HV} от экспериментальных Y_{HV} во всех точках плана по приведенному ниже выражению. Расчетные значения \hat{Y}_{HV} вычисляем по выражению (2), $s_E = 6,58$.

$$s_R = \sum (Y_{HV} - \hat{Y}_{HV})^2 = 195,5.$$

Определяем дисперсию:

$$s_{ал}^2 = \frac{s_R - s_E}{N - k' - (n_0 - 1)} = \frac{195,5 - 6,59}{15 - 7 - (3 - 1)} = 31,49,$$

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

Дисперсия $s^2\{Y_{HV}\} = 3,29$, поэтому находим расчетное значение F -критерия:

$$F_p = \frac{s_{ал}^2}{s^2\{Y_{HV}\}} = 9,56.$$

Табличное значение F -критерия при 5 %-м уровне значимости и числах степеней свободы для большей дисперсии $m_1 = N - k' - n_0 + 1 = 6$, для меньшей дисперсии $m_2 = n_0 - 1 = 2$, $F_T = 19,37$. Так как $F_p < F_T$, полученная модель (2) адекватна при 5 %-м уровне значимости.

В результате выполненного анализа уравнения (2) установлено, что в пределах определенных интервалов варьирования факторов увеличение фактора x_1 влияет на увеличение показателя микротвердости в большей мере, чем у факторов x_2 и x_3 . В связи с наличием квадратичных членов в уравнении (2) эта зависимость носит нелинейный характер, что наиболее сильно проявляется через фактор x_1 .

Для практических расчетов переходим от кодированных значений (x_1, x_2, x_3) факторов к натуральным значениям (T, P, C).

$$x_1 = \frac{T - T_0}{\Delta T}; \quad x_2 = \frac{P - P_0}{\Delta P}; \quad x_3 = \frac{C - C_0}{\Delta C},$$

где T_0, P_0, C_0 — натуральные значения факторов на основных уровнях; $\Delta T, \Delta P, \Delta C$ — значения интервалов варьирования.

Поэтому в соответствии с таблицей 2

$$x_1 = \frac{T - 1800}{100}; \quad x_2 = \frac{P - 6,5}{0,5}; \quad x_3 = \frac{C - 20}{10}.$$

При переходе к натуральным значениям факторов получаем следующий вид уравнения регрессии (2):

$$Y_{HV} = -1446,34 + 135,64 \cdot P + 7,004 \cdot C + 1,12 \cdot T - 0,00333 \cdot T \cdot C - 0,000292 \cdot T^2 - 10,68 \cdot P^2 - 0,0337 \cdot C^2. \quad (3)$$

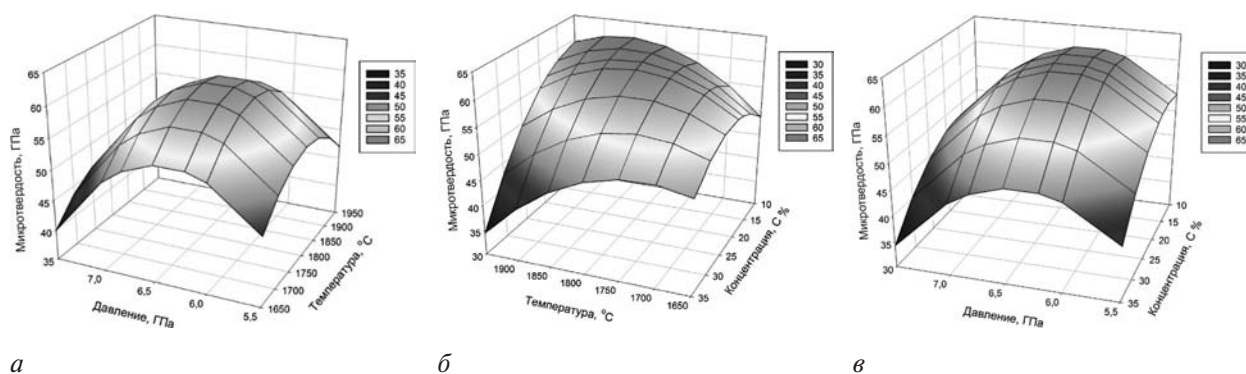


Рисунок 1 — Зависимость микротвердости HV от исследуемых факторов процесса: а — температура T и давление P ($C = 20\%$); б — температура T и концентрация C ($P = 6,5$ ГПа); в — давление P и концентрация C ($T = 1800$ °С)

Аналогично получено уравнение регрессии для $Y_{K_{1c}}$:

$$Y_{K_{1c}} = 7,53 - 0,1875x_1 - 0,1625x_2 - 0,23x_3 + 0,25x_1x_2 - 0,44x_{12} - 0,19x_{22} - 0,27x_{32}. \quad (4)$$

Полученная модель адекватна при 5 %-м уровне значимости, так как

$$F_p = \frac{s_{ал}^2}{s^2\{Y_{K_{1c}}\}} = 4,09 < F_T = 19,37.$$

После перехода от кодированных значений (x_1, x_2, x_3) факторов к натуральным значениям (T, P, C) уравнение 4 примет вид:

$$Y_{K_{1c}} = -103,7 - 0,000044 \cdot T^2 - 0,76 \cdot P^2 - 0,0027 \cdot C^2 + 0,124 \cdot T + 0,555 \cdot P + 0,085 \cdot C + 0,005 \cdot P \cdot T. \quad (5)$$

Анализ уравнения (5) показывает, что в пределах установленных интервалов варьирования факторов 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 .

Полученные уравнения регрессии (3) и (5) могут быть использованы при отработке технологических параметров спекания алмазных поликристаллических материалов и получения образцов ПСТМ с оптимальными значениями микротвердости и коэффициента трещиностой-

кости в зависимости от исследуемых факторов (T, P, C). На рисунках 1–2 представлены полученные зависимости микротвердости и коэффициента трещиностойкости от давления, температуры и концентрации добавки УДА-порошка. Построение поверхности откликов осуществляли с учетом только двух факторов.

Из рисунка 1 видно, что с увеличением температуры спекания T до определенного предела возрастает микротвердость. Дальнейшее увеличение T приводит к графитизации алмазного материала и снижению микротвердости. Аналогично, изменение давления P и концентрации модифицирующей добавки C приводит к изменению значения показателя коэффициента трещиностойкости K_{1c} , но в меньшей степени. Из рисунка 2 видно, что основным влияющим фактором на значение коэффициента трещиностойкости является температура спекания T , затем давление P и количество добавки УДА-порошка C . Максимальная микротвердость $HV = 58,4–63,7$ ГПа достигается при температуре спекания $T = 1875–1925$ °С, давлении спекания $P = 6,2–6,7$ ГПа и концентрации добавки УДА-порошка $C = 17,6–22,4\%$. Максимальный коэффициент трещиностойкости K_{1c} , достигаемый в данных диапазонах температуры, давления, и концентрации добавки УДА-порошка, равен $8,1–8,6$ МПа·м^{1/2}. Дальнейшее увеличение HV и K_{1c} приводит к увеличению давления и температуры спекания и, следовательно, к увеличению себестоимости материала.

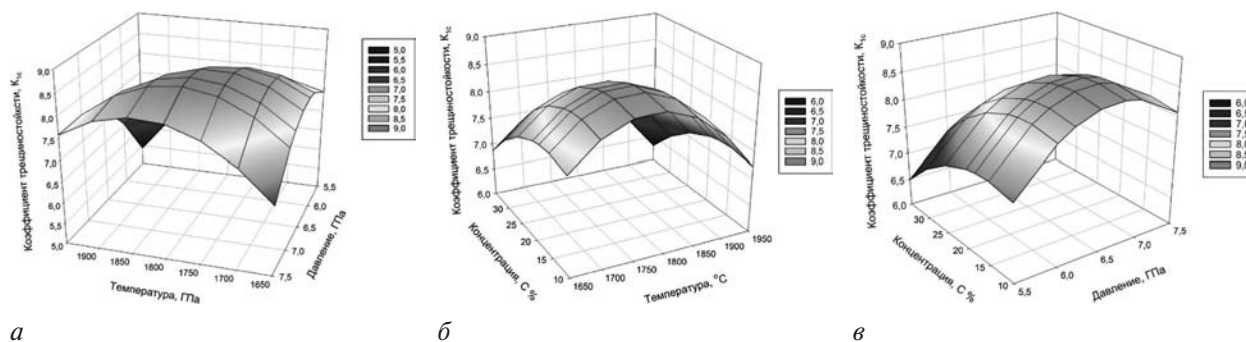
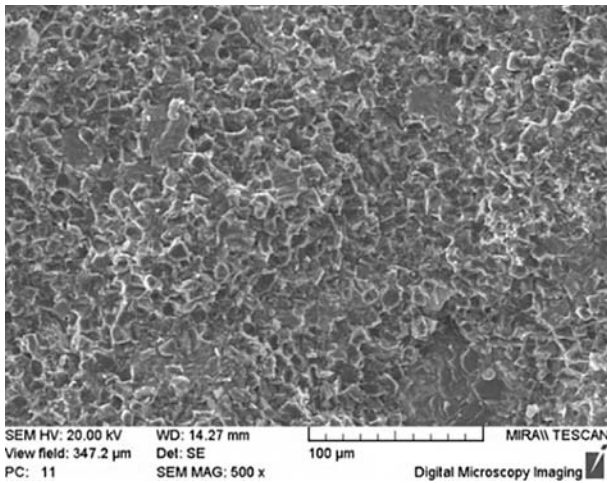
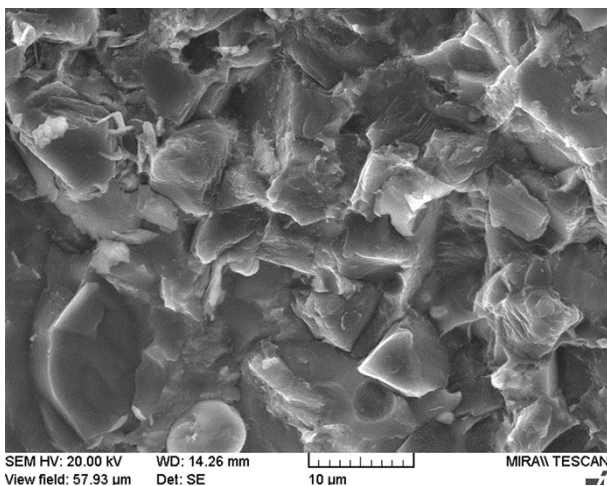


Рисунок 2 — Зависимость коэффициента трещиностойкости K_{1c} от исследуемых факторов процесса: а — температура T и давление P ($C = 20\%$); б — температура T и концентрация C ($P = 6,5$ ГПа); в — давление P и концентрация C ($T = 1800$ °С)



а



б

Рисунок 3 — Морфология поверхности ПСТМ АСМ 14/10 (Si) + УДА (В) после термобарической обработки полученного в оптимальных условиях: а — $\times 500$; б — $\times 3000$

Выводы. Таким образом, на основании проведенного моделирования можно заключить, что для получения оптимальных значений микротвердости и коэффициента трещиностойкости алмазного материала параметры процесса термобарического спекания должны находиться в следующих пределах: температура спекания $T = 1900^\circ\text{C} \pm 25^\circ\text{C}$, давление $P = 6,5 \text{ ГПа} \pm 0,25 \text{ ГПа}$, количество добавки УДА-порошка $C = 20 \text{ масс.}\% \pm 2,5 \text{ масс.}\%$.

Установлена взаимосвязь между физико-механическими характеристиками и микроструктурой полученного материала. Исследования морфологии поверхности излома спеченных в оптимальных условиях алмазных поликристаллов показало отсутствие микропор, несплошностей и локальных скоплений связки. Спеченный композиционный материал характеризуется однородной структурой с размером алмазных зерен менее 10 мкм;

при этом связка в виде прослоек равномерно распределена между алмазными зернами и имеет хорошую адгезию с поверхностями частиц алмаза (рисунок 3), что определяет высокие значения HV и K_{Ic} разработанного материала.

В результате проведенных исследований разработана математическая модель, позволяющая рассчитать граничные P -, T -условия спекания алмазных ПСТМ на основе нано- и микропорошков алмаза с заданным уровнем микротвердости и трещиностойкости, учитывающая влияние концентрации добавки УДА-порошка на физико-механические характеристики спеченного материала. Проведенная практическая проверка полученной модели показала ее адекватность в пределах выбранных интервалов варьирования технологических параметров. За счет оптимизации технологии модифицирования и термобарического спекания алмазных порошков удалось достигнуть оптимальных физико-механических свойств композита: микротвердости $HV = 58,4\text{--}63,7 \text{ ГПа}$ и трещиностойкости $K_{Ic} = 8,1\text{--}8,6 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Показано, что достижение высоких значений HV и K_{Ic} обусловлено мелкозернистой однородной структурой полученного материала с равномерным распределением прослоек связки между алмазными зернами.

Список литературы

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова. — М.: Машиностроение, 2014. — 608 с.
2. Шульженко, А.А. Поликристаллические сверхтвердые материалы в режущем инструменте. Ч. 1 / А.А. Шульженко, С.А. Клименко // Инструментальный свет. — 1999. — № 4. — С. 14–16.
3. Витязь, П.А. Синтез и применение сверхтвердых материалов / П.А. Витязь, В.Д. Грицук, В.Т. Сенють. — Минск: Беларус. наука, 2005. — 359 с.
4. Структурообразование карбидокремниевой матрицы в композиции алмаз — карбид кремния / В.Н. Ковалевский [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. — 2005. — № 5. — С. 8–14.
5. Способ получения поликристаллического алмазодержащего материала: пат. 2065834 РФ; МПК C22C 1/10 (2006.01), B22F 3/00 (2006.01), C22C 26/00 (2006.01) / В.Д. Бланк, Р.Х. Баграмов, С.А. Перфилов. — опубл. 10.03.08.
6. Способ получения композиционного материала из алмаза и карбида кремния: пат. 1729086 РФ; МПК C01B 31/06 (1995.01), C01B 31/36 (1995.01) / А.А. Шульженко, Г.А. Воронин, А.С. Осипов. — опубл. 27.11.95.
7. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.
8. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А. Витязь [и др.]. — Минск: Беларус. навука, 2013. — 381 с.
9. Долматов, В.Ю. Детонационные наноалмазы. Получение, свойства, применение / В.Ю. Долматов. — СПб.: Профессинал, 2011. — 536 с.
10. Структурные особенности алмазных порошков после поверхностного модифицирования активаторами спекания / П.А. Витязь [и др.] // Вестн. ВГТУ. — 2016. — № 1(30). — С. 62–73.

PARNITSKY Alexander M.

Junior Researcher¹

E-mail: europacorp@tut.by

ZHORNIK Victor I., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Deputy Head of the Department of Technologies of Mechanical Engineering and Metallurgy – Head of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials ¹

E-mail: zhornik@inmash.basnet.by

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

Leading Researcher¹

E-mail: vsenyut@tut.by

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 28 April 2017.

MATHEMATICAL MODELING OF PSHM DIAMOND SYNTHESIS TECHNOLOGICAL PROCESS FOR TOOL PURPOSE

With the use of a method of computational and experimental modeling the mathematical model of the process of obtaining the polycrystalline superhard material with the improved physical-mechanical characteristics is developed, which makes it possible to calculate boundary P-, T-parameters of the thermobaric sintering of polycrystalline material based on modified micro- and nanopowders of diamond. Thus, on the basis of the results of computational and experimental modeling it is established that in order to obtain optimum hardness and crack resistance coefficient of diamond material the parameters of the process of thermobaric sintering must be within the following ranges: the temperature of the sintering $T = 1900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, pressure $P = 6,5\text{ GPa} \pm 0,25\text{ GPa}$, an amount of addition of the nanodiamond powder, modified by boron $C = 20\text{ wt. } \% \pm 2.5\text{ wt. } \%$.

Keywords: *mathematical model, composite powders of diamond, modification, nanodiamonds, thermobaric treatment*

References

1. Novikov N.V. *Instrumenty iz sverxtverdykh materialov* [Tools of superhard materials]. Moscow, Mashinostroenie, 2014. 608 p.
2. Shulzhenko A.A., Klimenko S.A. Polikristallicheskie sverxtverdye materialy v rezhushhem instrumente. Ch. 1 [Polycrystalline superhard materials in the cutting tool. Part I]. *Instrumentalny svet* [Instrumental light], 1999, no. 4, pp. 14–16.
3. Vityaz P.A., Gricuk V.D., Senyut V.T. *Sintez i primeneniye sverxtverdykh materialov* [Synthesis and application of superhard materials]. Minsk, Belorusskaya nauka, 2005. 359 p.
4. Kovalevskij V.N., Gordeev S.K., Korchagina S.B., Fomixina I.V., Zhuk A.E. Strukturnoobrazovanie karbidokremnievoj matricy v kompozicii almaz – karbid kremniya [Structurization of a carbide-silicon matrix in a diamond-silicon carbide composition]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and technical ceramics], 2005, no. 5, pp. 8–14.
5. Blank V.D., Bagramov R.H., Perfilov S.A. *Sposob polucheniya polikristallicheskogoalmazosoderzhashhego materiala* [A method for producing a polycrystalline diamond-containing material]. Patent RF, no. 2065834, 2008.
6. Shulzhenko A.A., Voronin G.A., Osipov A.S. *Sposob polucheniya kompozitsionnogo materiala iz almaza i karbida kremniya* [Method for producing a composite material of diamond and silicon carbide]. Patent RF, no. 1729086, 1995.
7. Spiridonov A.A. *Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh processov* [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie, 1981. 184 p.
8. Vityaz P.A. [et al.] *Nanoalmazы detonatsionnogo sinteza: poluchenie i primeneniye* [Nanodiamonds of detonation synthesis: production and application]. Minsk, Belaruskaya nauka, 2013. 381 p.
9. Dolmatov V.Yu. *Detonatsionnye nanoalmazы. poluchenie, svoystva, primeneniye* [Detonation nanodiamonds. Receiving, properties, application]. St. Petersburg, Professional, 2011. 536 p.
10. Vityaz P.A., Senyut V.T., Zhornik V.I., Parnickij A.M., Gamzeleva T.V. Strukturnye osobennosti almaznykh poroshkov posle poverkhnostnogo modifitsirovaniya aktivatorami spekaniya [Structural features of diamond powders after surface modification by sintering activators]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Vestnik of Vitebsk State Technological University], 2016. no. 1(30), pp. 62–73.