

УДК 539.319: 548.33.621

**А.В. Степаненко**, канд. физ.-мат. наук

*Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, г. Киев*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПСТМ ИЗ ВЮРЦИТНОГО НИТРИДА БОРА НА ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ**

*Theoretical study of the level of residual stress in phase composite  $BN_{sf}+BN_v$  was investigated by the statistical theory. Stress-strain state of boron nitride composite depends on parameters of sintering. Level of residual stress in a composite obtained at the real conditions is high. Tensile stresses in  $BN_{sf}$  and compressive stresses in  $BN_v$  are  $\sim 1.5$  GPa and  $\sim 1,1$  GPa correspondingly.*

#### **Введение**

Применение режущего инструмента из сверхтвердых материалов (СТМ) позволяет значительно улучшить технико-экономические показатели металлообработки. Физико-механические и эксплуатационные характеристики (износостойкость, упругость, трещиностойкость и др.) таких материалов в значительной мере определяются напряженно-деформированным состоянием образцов. Можно прогнозировать высокие механические и служебные свойства композита, где менее прочная непластичная фаза будет сжата, а более прочная находиться под действием растягивающих напряжений. Примером может служить получаемый при высоком давлении и высокой температуре композиционный материал алмаз-SiC, где напряжения являются сжимающими в карбиде кремния и растягивающими в алмазе [1].

При заданных свойствах компонентов композита результирующее напряженное состояние будет зависеть от объемного содержания компонентов и определяться режимами спекания. В этой связи прогнозирование и исследование уровня и распределения остаточных напряжений в сверхтвердых материалах имеют важное значение.

Цель настоящей работы – рассчитать остаточные напряжения в композиционном материале BN сфалеритный + BN вюрцитный ( $BN_{сф} + BN_v$ ).

### Экспериментальная и расчетная части

Образцы композита ( $\text{BN}_{\text{сф}} + \text{BN}_{\text{в}}$ ) получали путем спекания порошков вюрцитного нитрида бора при высоких давлениях (6–8 ГПа) и температуре (1400–1800 °С) [2]. Типичные структуры таких композитов приведены в работах [3, 4].

Напряжения анализировали с использованием соответствующей статистической теории, развитой Л.П. Хорошуном [5]. Приведенные в [3] данные свидетельствуют, что размеры структурных неоднородностей  $s$  в композитах из нитрида бора не превышают 50 мкм. В этой связи предполагали, что в образцах размером  $\gg s$  распределение структурных элементов в композите носит случайный характер, а материал является линейно-упругим.

Рассматривали напряжения в композите, возникающие при спекании из-за изменения удельного объема вследствие фазового перехода вюрцит  $\rightarrow$ сфалерит, а также при охлаждении и снятии внешнего давления после спекания вследствие разности коэффициентов термического расширения и сжимаемости сфалеритной и вюрцитной фаз  $\text{BN}$ . Эти напряжения уравниваются в объемах, содержащих ближайшие зерна вокруг рассматриваемого, и по сути являются микронапряжениями. Однако будучи растягивающими во всех зернах одной фазы и сжимающими в зернах другой фазы, эти напряжения приводят к сдвигу рентгеновских дифракционных кривых от этих фаз, как в случае с макронапряжениями.

Для средних макронапряжений и макродеформаций в композите справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \langle \sigma_{ij} \rangle &= c_v \langle \sigma_{ij}^v \rangle + c_{sf} \langle \sigma_{ij}^{sf} \rangle \\ \langle \varepsilon_{ij} \rangle &= c_v \langle \varepsilon_{ij}^v \rangle + c_{sf} \langle \varepsilon_{ij}^{sf} \rangle, \end{aligned} \quad (1)$$

$\langle \varepsilon_{ij}^v \rangle$ ,  $\langle \varepsilon_{ij}^{sf} \rangle$  и  $\langle \sigma_{ij}^v \rangle$ ,  $\langle \sigma_{ij}^{sf} \rangle$  – средние деформации и напряжения в фазах композита соответственно вюрцитной и сфалеритной,  $c_v$ ,  $c_{sf}$  – объемные концентрации соответствующих фаз.

Считая, что общие средние напряжения в композите  $\langle \sigma_{ij} \rangle = 0$  и пренебрегая флуктуациями деформаций в пределах отдельных компонентов, получаем [4]

$$\begin{aligned} \langle \sigma_{ij}^v \rangle &= c_{sf} \eta \delta_{ij} \\ \langle \sigma_{ij}^{sf} \rangle &= -c_v \eta \delta_{ij}, \end{aligned} \quad (2)$$

где 
$$\eta = \frac{\gamma}{K_v K_{sf} + \langle K \rangle \gamma} ((K_v - K_{sf}) p_s - 3K_v K_{sf} ((\alpha_v - \alpha_{sf}) \Delta T + (e_v - e_{sf})));$$
  

$$\gamma = 4\langle \mu \rangle / 3 \quad \langle K \rangle = c_v K_v + c_{sf} K_{sf}; \quad \langle \mu \rangle = c_v \mu_v + c_{sf} \mu_{sf};$$

$\Delta T = T^* - T_k$ ; где  $T^*$  и  $T_k$  – температура релаксации соответственно напряжений и окружающей среды;  $K_v$ ,  $K_{sf}$ ,  $\mu_v$ ,  $\mu_{sf}$  – модули соответственно объемного сжатия и сдвига компонент;  $\alpha_v$ ,  $\alpha_{sf}$ ,  $e_v$ ,  $e_{sf}$  – коэффициенты соответственно линейного температурного расширения и изменения удельного объема  $\text{BN}_{\text{в}}$  и  $\text{BN}_{\text{сф}}$ .

### Обсуждение результатов исследований

В соответствии с данными [6, 7] при спекании  $\text{BN}$  следует рассматривать два возможных случая:

- температура спекания композита  $T_s < T^* \approx 2000$  К (температура релаксации напряжений). При этом следует учитывать напряжения, связанные с изменением удельного объема из-за фазового перехода  $\text{BN}_{\text{в}} \rightarrow \text{BN}_{\text{сф}}$ ;

- температура спекания композита  $T_s > T^*$ . При этом напряжения в компонентах композита, возникающие вследствие изменения удельного объема при фазовом переходе вюрцитного BN в сфалеритный, релаксируют.

Поскольку в расчете не учитываются температурные изменения констант упругости, получаемые результаты будут носить полуколичественный характер и содержать сведения о распределении напряжений в композите и их уровне.

Для расчета использовали данные, которые приведены в табл. 1 [7].

Таблица 1. Данные для расчета остаточных напряжений в композите из BN

Фаза	Модуль объемного сжатия К, ГПа	Модуль сдвига М, ГПа	КТР $\alpha/10^{-6}$ , К <sup>-1</sup>	Изменение удельного объема
BN <sub>в</sub>	333	363	3,03	$\epsilon_{в} - \epsilon_{сф} = -3,2 \cdot 10^{-3}$
BN <sub>сф</sub>	375	409	2,8	

Для первого случая расчеты выполнены при  $\Delta T = -1400$  °С;  $-1600$  °С и давлениях спекания 6,0 и 8,0 ГПа. Результаты расчета остаточных напряжений в композите из BN приведены на рис. 1 и в табл. 2.

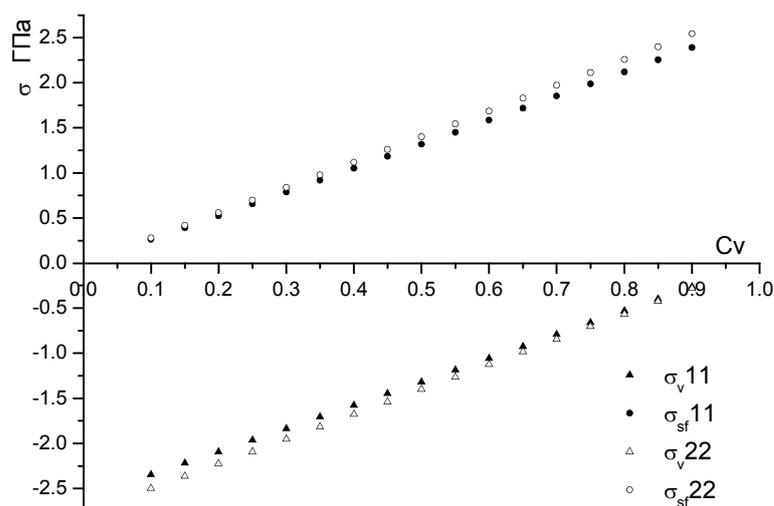


Рис. 1. Остаточные напряжения в фазах композита BN:  $\sigma_{v11}$  – вюрцит,  $\sigma_{sf11}$  – сфалерит  $P_s = 6,0$  ГПа,  $\Delta T = -1400$  °С;  $\sigma_{v22}$  – вюрцит,  $\sigma_{sf22}$  – сфалерит  $P_s = 8,0$  ГПа,  $\Delta T = -1600$  °С

Таблица 2. Результаты расчета остаточных напряжений в композите из BN

$C_v$ , % об.	$\sigma_{v11}$ , ГПа	$\sigma_{sf11}$ , ГПа	$\sigma_{v12}$ , ГПа	$\sigma_{sf12}$ , ГПа	$\sigma_{v21}$ , ГПа	$\sigma_{sf21}$ , ГПа
0,1	-2,348	0,261	-2,374	0,264	-2,473	0,275
0,2	-2,092	0,523	-2,115	0,529	-2,204	0,551
0,3	-1,835	0,787	-1,855	0,795	-1,933	0,829
0,4	-1,577	1,051	-1,594	1,063	-1,661	1,107
0,5	-1,317	1,317	-1,331	1,331	-1,387	1,387
0,6	-1,056	1,584	-1,067	1,601	-1,112	1,668
0,7	-0,793	1,851	-0,802	1,872	-0,836	1,95
0,8	-0,53	2,12	-0,536	2,143	-0,558	2,233
0,9	-0,265	2,389	-0,268	2,415	-0,28	2,517

Из полученных данных следует, что более прочная сфалеритная фаза нитрида бора находится под действием значительных растягивающих напряжений, а менее прочная – вюрцитная – значительных сжимающих напряжений. В этой связи можно ожидать, что прочностные и служебные характеристики такого материала будут довольно высокими.

Результаты исследования влияния температуры и давления спекания (табл. 2) свидетельствуют, что при увеличении как температуры спекания, так и давления спекания остаточные напряжения в фазах материала незначительно повышаются по абсолютной величине. Так для композита ( $0,4\text{BN}_{\text{сф}} + 0,6\text{BN}_{\text{в}}$ ) при повышении температуры спекания на  $200\text{ }^\circ\text{C}$  напряжения сжатия в вюрцитной фазе изменятся от 1,06 до 1,07 ГПа, а растягивающие напряжения в сфалерите от 1,58 до 1,60 ГПа.

Зависимость рассчитанных остаточных напряжений от содержания  $\text{BN}_{\text{сф}}$  для образцов композита при  $\Delta T = -1700\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_s = 8,0\text{ ГПа}$  изображена на рис. 2.

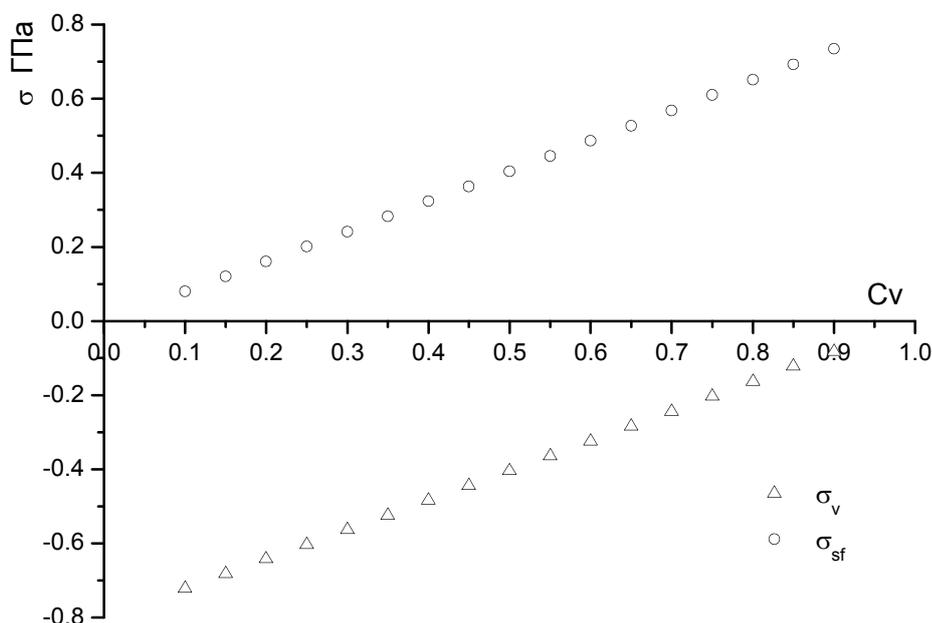


Рис. 2. Остаточные напряжения в вюрцитной и сфалеритной фазах композита  $\text{BN}$  при  $P_s = 8,0\text{ ГПа}$  и  $\Delta T = -1700\text{ }^\circ\text{C}$ .

Полученные данные свидетельствуют, что напряженно-деформированное состояние композита качественно не изменилось, однако напряжения в фазах материала стали значительно меньше. Так для композита ( $0,4\text{BN}_{\text{сф}} + 0,6\text{BN}_{\text{в}}$ ) напряжения сжатия в вюрцитной фазе изменятся от 0,27 до 0,32 ГПа, а растягивающие напряжения в сфалерите – от 0,40 до 0,49 ГПа.

Также было исследовано влияние давления спекания  $P_s$  на остаточные напряжения в фазах. Рассчитывали напряжения в компонентах при изменении давления в интервале 1–9,0 ГПа и  $\Delta T = -1700\text{ }^\circ\text{C}$ . Установлено (рис. 3), что знак напряжений в фазах композита не зависит от давления спекания.

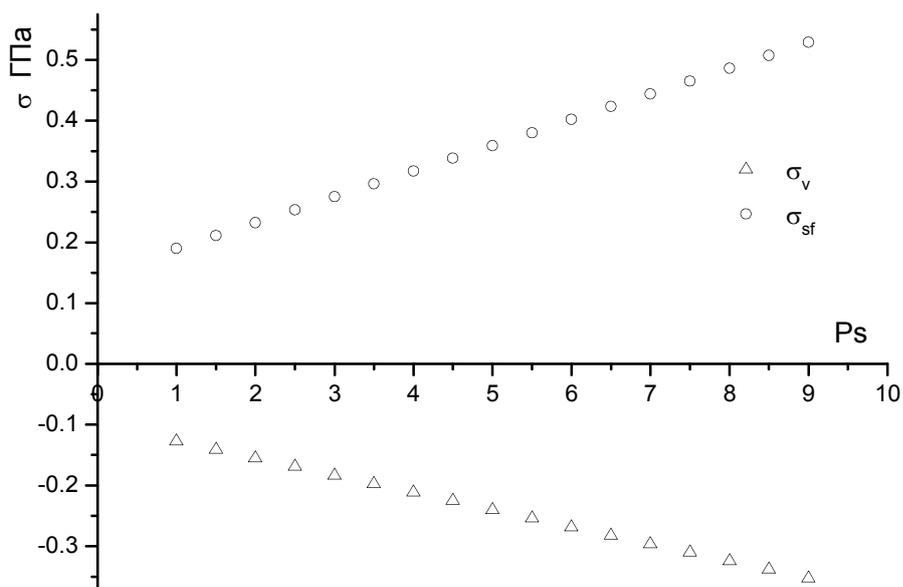


Рис. 3. Зависимость остаточных напряжений от давления спекания в вюрцитной и сфалеритной фазах композита VN ( $c_v = 60\%$  (по объему),  $\Delta T = -1700\text{ }^\circ\text{C}$ )

Результаты анализа зависимости остаточных напряжений в рабочем интервале давлений спекания (6,0–8,0 ГПа) свидетельствуют, что с повышением  $P_s$  от 6,0 до 8,0 ГПа напряжения в фазах также незначительно увеличиваются (рис. 4) по абсолютной величине. Так, для композита (0,4VN<sub>сф</sub> + 0,6VN<sub>в</sub>) напряжения сжатия в вюрцитной фазе изменятся от 0,27 до 0,33 ГПа, а растягивающие напряжения в сфалерите – от 0,41 до 0,50 ГПа.

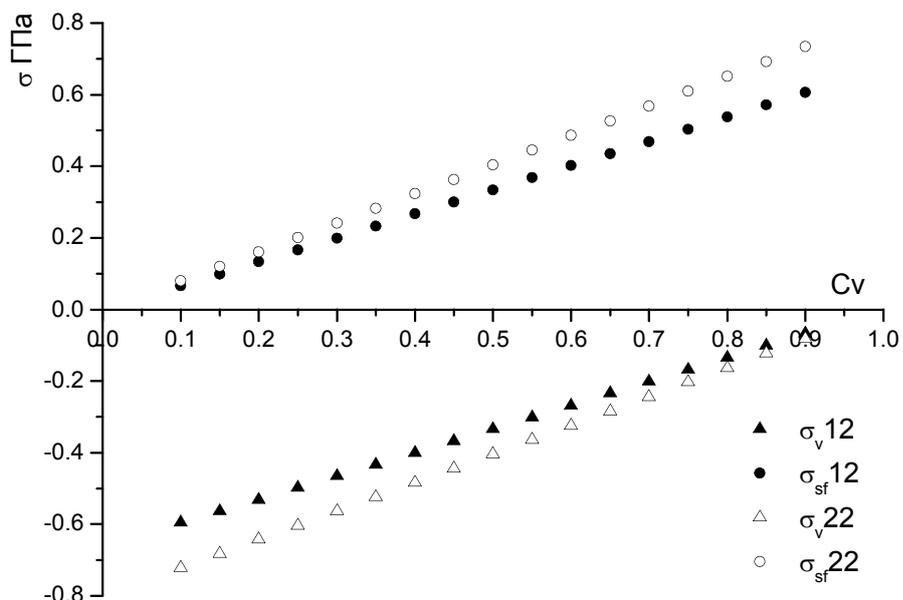


Рис. 4. Остаточные напряжения в фазах композита VN при  $\Delta T = -1700\text{ }^\circ\text{C}$ :  $\sigma_{v12}$  – вюрцит  $P_s = 6,0$  ГПа;  $\sigma_{sf12}$  – сфалерит  $P_s = 6,0$  ГПа;  $\sigma_{v22}$  – вюрцит  $P_s = 8,0$  ГПа;  $\sigma_{sf22}$  – сфалерит  $P_s = 8,0$  ГПа

Сравнение полученных данных с экспериментальными и расчетными результатами [7] показало, что рассмотренный статистический подход к анализу напряженно-деформированного состояния композиционного материала из нитрида бора является перспективным.

### Выводы

Напряженно-деформированное состояние композиционного материала  $\text{BN}_{\text{сф}} + \text{BN}_{\text{в}}$  определяется температурой его спекания:

- если процесс получения такого материала осуществляется при температуре ниже температуры релаксации напряжений (2000 К), остаточные напряжения в фазах значительно увеличиваются (~ 2 ГПа);
- если температура спекания превышает температуру релаксации, остаточные напряжения в композите значительно снижаются (~ 0,3-0,5 ГПа)

### Литература

1. Анализ уровня остаточных напряжений в композите алмаз-карбид кремния. Часть 1. Расчет внутренних напряжений / А.В. Степаненко, О.Н. Григорьев, Н.Д. Бега и др. // Огнеупоры и техническая керамика. – 2005. – № 7. – С. 8–11.
2. Формирование микромеханических свойств крупноразмерных заготовок ПСТМ при спекании порошков вюрцитного нитрида бора, активированных прокаткой / В.М. Волкогон, О.Н. Григорьев, С.К. Аврамчук и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – вып. 8. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2005. – С. 244–248.
3. Волкогон В.М., Олейник Г.С. Влияние предварительной обработки порошков  $\text{BN}_{\text{в}}$  прокаткой на фазовое превращение вюрцит → сфалерит при спекании гексаниа-Р // Сверхтвердые материалы. – 2003. – № 1. – С. 22–31.
4. Олейник Г.С. Структурные механизмы формирования керамики на основе вюрцитной модификации нитрида бора // Сверхтвердые материалы. – 1993. – № 6. – С. 3–12.
5. Хорошун Л. П. Методы теории случайных функций в задачах о макроскопических свойствах микронеоднородных сред // Прикладная механика. – 1978. – 14, № 2. – С. 3–17.
6. Григорьев О. Н., Трефилов В. И., Хорошун Л. П. Остаточные напряжения в двухфазных керамических материалах // Матер. III Всесоюз. Симпоз. «Технологические остаточные напряжения». – М.: Изд-во АН СССР. – 1988. – С. 129–133.
7. Григорьев О. Н., Креер В., Помпе В., Трефилов В.И. Исследование внутренних напряжений в поликристаллах нитрида бора // Порошковая металлургия. – 1987. – № 12. – С. 72–76.

*Поступила 13.06.08*