

Досліджені закономірності зношування різальних пластин з композитів на основі cBN різного фазового складу та різних технологій спікання з керамічною матрицею групи BL при чистовій обробці загартованих сталей.

**Ключові слова:** кубічний нітрид бору, загартована сталь, знос, чистова обробка, надтверді матеріали.

*The regularities of wear of the cutting plates made of composites based on cBN different phase structure and various technologies of sintering with ceramic matrix BL group during finishing of hardened steels was investigated.*

**Key words:** cubic boron nitride, hardened steel, wear, finishing, superhard materials.

### Литература

1. Петруша І. А. Керамо-матричні композити на основі кубічного нітриду бору для швидкісної обробки загартованих сталей типу ШХ15 / І.А. Петруша, О.С. Осіпов, В.М. Бушля, та ін. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения : сб. науч. тр. – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2014. – Вып. 17. – С. 260–265.
2. Пат. UA 57353 U, В 23 В 27/16. Різальний інструмент / Л.М. Девін, О.А. Осадчий. – Заявл. 19.07.2010, Опубл. 25.02.2011, Бюл. № 4.
3. Девин Л.Н. Повышение эксплуатационных характеристик резцов из КНБ путем увеличения их демпфирующих свойств / Л.Н. Девин, А.А. Осадчий // Сверхтвердые матер. – 2012. – № 5. – С. 62–71.
4. Devin L. M. Application of acoustic methods for the monitoring of products made of hard alloys / L.M. Devin, V.P. Bondarenko, O.A. Osadchy, T.V. Nimchenko // Mater. Sci. – 2009. – 45 (3). – P. 392–398.
5. Девин Л. Н. Применение пакета Power Graph для исследования процесса резания / Л.Н. Девин, А.Г. Сулима // Промышленные измерения: контроль, автоматизация диагностика. – 2008. – № 3. – С. 24–26.

Поступила 04.06.15

УДК 621.762.862

**В.П. Бондаренко**, чл.-кор. НАН Украины; **И.В. Андреев**, канд. техн. наук; **Л.Г. Тарасенко**

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев*

### ОЦЕНКА ВЫСОТЫ ПОДЪЕМА ЖИДКОГО ЛИТИЯ ПО ПОРАМ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА, СПЕЧЕННОГО ИЗ ПОРОШКОВ ВОЛЬФРАМА С ЧАСТИЦАМИ РАЗМЕРОМ ДО 1-1000 МКМ

Обоснована методика и выполнен расчет высоты подъема расплавленного лития по капиллярам пористого материала, спеченного из частиц вольфрама размером от 1 до 1000 мкм допористости 20–50 %. Показано, что при использовании указанных материалов при температурах 200–1000 °С можно обеспечить высоту подъема расплава лития от 0,8 до 620 м.

**Ключевые слова:** поры, жидкий литий, частицы вольфрама, спеченные пористо-капиллярные системы.

Пропитанные литием пористые вольфрамовые материалы перспективны для защиты деталей первой стенки и дивертора, повернутых в сторону плазмы термоядерного реактора (ТЯР) [1]. В этих целях рекомендуется применять материалы из сеток [2; 3], что, вероятно, обусловлено их повышенной проницаемостью, простотой прогнозирования структурных и гидравлических характеристик [4], доступностью изготавливаемых промышленностью исходных сетчатых материалов.

Пористые высокопроницаемые материалы из порошков вольфрама не производят из-за отсутствия порошков вольфрама с размерами частиц более 50 мкм.

В последнее время [5–8] определены условия получения порошков вольфрама с размерами частиц до 1000 мкм кубической, полиэдрической и близкой к сферической форм. В этой связи открываются широкие перспективы для изготовления пористых проницаемых материалов из порошков вольфрама с частицами разного размера и формы, а также смесей таких частиц. При производстве подобных материалов исключается необходимость предварительного изготовления проволоки вольфрама различного диаметра и плетения сеток с разным сечением ячеек, что довольно дорого и сложно в аппаратурном обеспечении. Однако гидравлические характеристики порошковых пористых вольфрамовых материалов с частицами размером до 1000 мкм до сих пор не оценивали, что не позволяет оценивать перспективы их использования в качестве защитных материалов в ТЯР.

В связи с изложенным цель настоящей работы – осуществить аналитическую оценку гидравлических характеристик вольфрамовых порошковых материалов с частицами сферической формы размером до 1000 мкм в их взаимодействии с расплавом лития при стационарном режиме работы ТЯР.

При стационарном режиме работы ТЯР пористая капиллярная система должна обеспечивать подъём за счёт капиллярных сил расплава лития на заданную высоту и сохранение полного заполнения капилляров литием при его испарении с поверхности пористого материала в вакуум.

Высоту подъёма расплава лития за счёт капиллярных сил можно оценить по уравнению

$$h = \frac{4\sigma\cos\theta}{\rho g d_{cp}}, \text{ м}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м;  $\theta$  – краевой угол смачивания, град;  $\rho$  – плотность расплавленного лития, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ;  $d_{cp}$  – средний диаметр капилляра, м.

В качестве  $d_{cp}$  для оценочных расчётов можно использовать средний диаметр поры в порошковом пористом материале.

Температура плавления лития составляет 180,54 °С, температура кипения – 1342 °С, поэтому он может удерживаться в капиллярах в широком температурном интервале, что очень важно для защитных материалов ТЯР. При температуре 20 °С плотность природного лития составляет 0,5316±0,0011 г/см<sup>3</sup>. При плавлении объём лития увеличивается на 1,5%, при повышении температуры с 25 до 1000 °С удельный объём лития увеличивается примерно на 20%.

Как указано [3] без ссылки на авторов зависимость плотности (кг/м<sup>3</sup>) лития от температуры выше температуры плавления описывается по различным данным уравнениями

$$\rho = 515 - 0,101 (t - 200) \quad (2)$$

для  $200 < t < 1600$  °С;

$$\rho = 508,2 - 0,0336 (t - 271,7) - 4,8279 \cdot 10^{-7} (t - 271,7)^2 - 5,2853 \cdot 10^{-9} (t - 271,7)^3 \quad (3)$$

для  $300 < t < 1000$  °С;

$$\rho = 536,8 - 0,0208t \quad (4)$$

для  $400 < t < 1125$  °С.

В работе [3] имеющие данные обработки с учетом их статистического веса и предложено обобщённое уравнение именно его будем использовать далее

$$\rho = 540,43 - 0,02729 (t + 273,2) - 8,0035 (t + 273,2)^2 \cdot 10^{-5} + 3,799 (t + 273,2)^3 \cdot 10^{-8}, \text{ кг/м}^3 \quad (5)$$

Приведем рассчитанную по уравнению (5) плотность расплавленного лития при различной температуре:

$$\rho_{200 \text{ °С}} = 513,63 \text{ кг/м}^3; \rho_{300 \text{ °С}} = 505,64 \text{ кг/м}^3; \rho_{500 \text{ °С}} = 489,04 \text{ кг/м}^3; \rho_{1000 \text{ °С}} = 454,36, \text{ кг/м}^3.$$

Как видим, при температуре 1000 °С плотность расплавленного лития меньше плотности лития при температуре 200 °С на 11,54%, что соответствует указанному изменению объёма и может

повлиять на высоту подъёма лития в капиллярах при различной температуре. В этой связи при оценке высоты подъёма расплава лития по порам при заданной температуре принимались значение  $\rho$ , рассчитанное по (5).

Поверхностное натяжение  $\sigma$  расплавленного лития в температурном интервале 200 – 1300 °С описывается двумя экспериментально полученными уравнениями:

$$\sigma = 0,16 (3550 - T) \cdot 10^{-5} - 95, \text{ Н/см}; \quad (6)$$

$$\sigma = 3,53 \cdot 10^6 \cdot \rho^{-2} \exp(-1815\rho^{-2}), \text{ Н/см}, \quad (7)$$

где  $T$  – температура, К;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

В [3] предложено обобщенное уравнение

$$\sigma = 438,98 - 18,44 \cdot 10^{-3}T - 132,20 \cdot 10^{-6}T^2 + 37,44 \cdot 10^{-9}T^3, \text{ мН/м}. \quad (8)$$

Приведем рассчитанное по уравнению (8) поверхностное натяжение расплавленного лития при различной температуре:

$$\sigma_{200 \text{ °С}} = 404,62 \cdot 10^{-3}, \text{ Н/м}; \sigma_{300 \text{ °С}} = 392,03 \cdot 10^{-3}, \text{ Н/м}; \sigma_{500 \text{ °С}} = 363,01 \cdot 10^{-3}, \text{ Н/м}; \sigma_{1000 \text{ °С}} = 278,48 \cdot 10^{-3}, \text{ Н/м}.$$

Следовательно, при повышении температуры расплавленного лития с 200 до 1000 °С его поверхностное натяжение уменьшится на 31,17%, что значительно превышает уменьшение плотности лития (11,54%) и соответственно в большей степени повлияет на снижение высоты  $h$  с повышением температуры.

В связи с тем, что  $\sigma$  и  $\rho$  в уравнение (1) входят в первой степени, можно утверждать, что при повышении температуры с 200 до 1000 °С высота  $h$  подъёма расплава лития по капиллярам уменьшается в 1,27 раза. Эту возможность существенного уменьшения  $h$  необходимо учитывать, когда высота подъёма расплава соизмерима с высотой пористого пропитанного изделия, так как при высокой температуре поверхностный слой такого изделия оголится, а защитный эффект лития исчезнет.

Следующей характеристикой расплава, которая влияет на высоту его подъёма по капилляру, является краевой угол смачивания  $\theta$ . Данные об угле  $\theta$  для лития на поверхности вольфрама отсутствуют. Некоторые данные о смачивании твердых поверхностей расплавом лития приведены в [9]. Из этого обзора следует, что  $\theta = 0$  только на поверхности Си. На большинстве изученных твердых поверхностей в температурном интервале 200 – 400 °С угол  $\theta > 50^\circ$ . Однако на поверхностях молибдена и тантала при температуре 420 – 1200 °С угол  $\theta = 15 \pm 5^\circ$ . Поскольку вольфрам в таблице Д.И. Менделеева расположен рядом с танталом и молибденом, предположим, что и на поверхности вольфрама краевой угол смачивания  $\theta = 15 \pm 5^\circ$ . В этой связи в расчётах примем  $\theta = 15^\circ$ . Тогда  $\text{Cos } 15^\circ = 0,966$ .

Последней характеристикой капиллярно-пористой системы, которую следует учитывать при оценке высоты  $h$  подъёма расплава лития, является средний диаметр капилляра. В связи с тем, что в реальных пористых средах капиллярами являются поры, образованные частицами, предложены несколько формул, по которым с некоторым приближением можно определить диаметр пор  $d_{\text{п}}$  идеальной пористой среды, образованных частицами диаметром  $d_{\text{ч}}$ , с пористостью  $\Pi$  [4].

В соответствии с формулой Козени для материалов, образованных сферическими частицами,

$$d_{\text{п}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\Pi}{1 - \Pi} \cdot d_{\text{ч}} \quad (9)$$

В действительности диаметры частиц различные, поэтому обычно используют средний диаметр частиц  $d_{\text{ч ср}}$ . В соответствии с этим диаметр пор следует обозначать  $d_{\text{п ср}}$ .

Экспериментально [4] определен ряд зависимостей  $d_{\text{п ср}}$  от  $d_{\text{ч ср}}$ . Так для образцов из сферических частиц диаметром 35 – 63 мкм при относительной пористости образцов 0,2 – 0,3 можно использовать уравнение (9). При использовании частиц  $d_{\text{ч ср}} = 100\text{--}200$  мкм необходимо использовать уравнение

$$d_{\text{п ср}} = 19\Pi^{1,9} d_{\text{ч ср}} \quad (10)$$

а при использовании частиц с  $d_{\text{ч ср}} = 200\text{--}315$  мкм и  $d_{\text{ч ср}} = 315\text{--}500$  мкм – уравнение

$$d_{\text{п ср}} = 1,2\Pi^{1,7} d_{\text{ч ср}}, \quad (11)$$

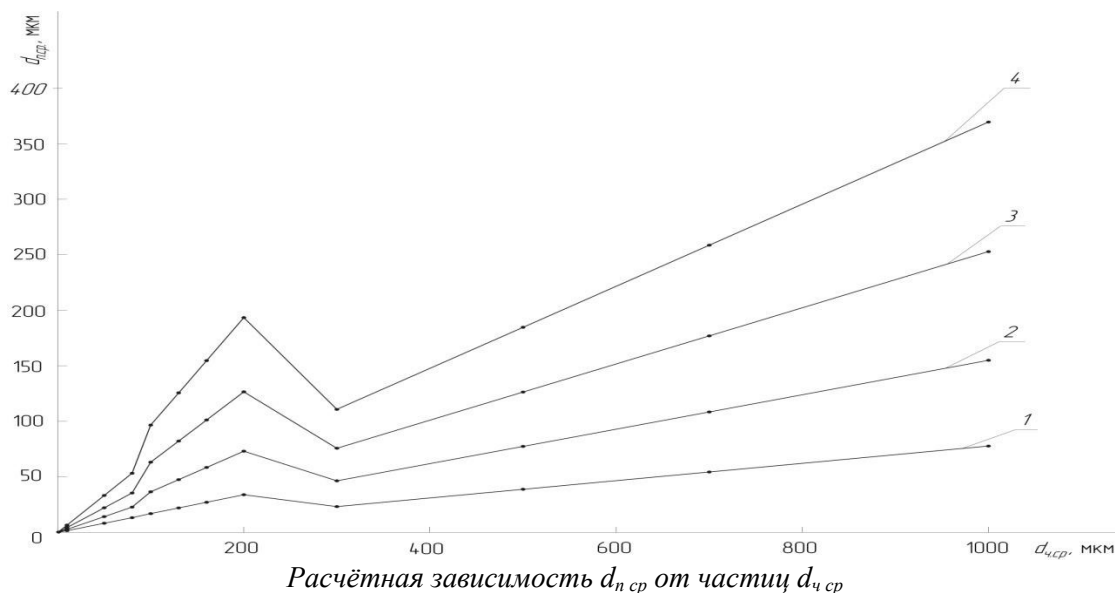
Для образцов из частиц большего размера зависимость  $d_{п\text{ ср}}$  от  $d_{ч\text{ ср}}$  в литературе отсутствуют, поэтому учитывая, что для образцов, изготовленных из частиц  $d_{ч\text{ ср}} = 200\text{--}315$  мкм и  $d_{ч\text{ ср}} = 315\text{--}500$  мкм, зависимость  $d_{п\text{ ср}}$  от  $d_{ч\text{ ср}}$  одинакова, довольно обоснованно можно принять, что и для частиц  $d_{ч\text{ ср}}$  больше 500 мкм она будет идентичной уравнению (11).

Проанализировав полученные данные для образцов из частиц  $d_{ч\text{ ср}} = 100$  мкм можно использовать уравнение (9), для образцов из частиц  $d_{ч\text{ ср}} = 100\text{--}200$  мкм – уравнение (10), для образцов из частиц  $d_{ч\text{ ср}} > 200$  мкм – уравнение (11).

Из порошков вольфрама прессованием и спеканием можно получить образцы пористостью 20 – 50%. Для расчёта принимаем  $\Pi = 0,2$ ;  $\Pi = 0,3$ ;  $\Pi = 0,4$  и  $\Pi = 0,5$ . Рассчитанные по формулам (9) – (11) значения  $d_{п\text{ ср}}$  сведены в табл. 1 – зависимость  $d_{ч\text{ ср}}$  показана на рисунке.

Таблица 1. Зависимость среднего диаметра пор  $d_{п\text{ ср}}$  от размера частиц  $d_{ч\text{ ср}}$  и пористости образца

Пористость $\Pi$	Значение $d_{п\text{ ср}}$ при – $d_{ч\text{ ср}}$ в диапазоне диаметра частиц											
	до 100 мкм				100–200 мкм				> 200 мкм			
	1	10	50	80	100	130	160	200	300	500	700	1000
0,2	0,17	1,67	8,33	13,33	17,00	22,1	27,2	34,00	23,34	38,90	54,46	77,80
0,3	0,29	2,86	14,29	22,86	36,60	47,58	58,56	73,20	46,50	77,50	108,50	155,00
0,4	0,44	4,44	22,22	35,55	63,30	82,29	101,28	126,60	75,84	126,40	176,96	252,80
0,5	0,67	6,67	33,33	53,33	96,70	125,71	154,72	193,40	110,82	184,70	258,58	369,40



Как следует из данных табл. 1, используя частицы различного диаметра и обеспечивая заданную пористость образцов, можно обеспечить любой средний диаметр пор – от долей микрометра до нескольких сотен микрометров.

Согласно рис. 1 рациональнее использовать формулы (9) и (11). Поскольку при повышенной пористости полученные по формуле (10)  $d_{п\text{ ср}}$  существенно превышают значения, полученные по формулам (9) и (11), использование формулы (10) сомнительно.

В связи с изложенным значения  $h$  рассчитаем по данным табл. 1, полученным по формулам (9) и (11). При этом примем значения  $\rho$  и  $\sigma$ , рассчитанные по обобщённым формулам (5) и (8) в температуре 200, 300, 500 и 1000 °С и сведённые в табл. 2.

Таблица 2. Зависимость расчётных значений  $\rho$  и  $\sigma$  от температуры

Характеристика	Значение при температуре			
	200 °С	300 °С	500 °С	1000 °С
$\rho$	513,63	505,64	489,04	454,36
$\sigma$	404,62	392,03	363,01	278,48

Рассчитанные значения  $h$  при различных значениях температуры и диаметра  $d_{п\text{ ср}}$  приведены в табл. 3.

Таблица 3. Зависимость высоты подъёма расплава лития по капиллярно-пористым материалам от температуры расплава

Температура расплава, °С	Высота подъёма расплава лития, м, при среднем диаметре пор								
	0,5 мкм	1,0 мкм	2,0 мкм	5,0 мкм	10,0 мкм	50 мкм	100 мкм	200 мкм	300 мкм
200	620	310	155	62	31	6,2	3,1	1,5	1,0
300	612	306	153	61	30,6	6,1	3,0	1,5	1,0
500	586	293	147	59	29,3	5,8	2,9	1,45	1,0
1000	484	242	121	48	24,2	4,8	2,4	1,2	0,8

Как следует из табл. 3, если при спекании пористых прессовок из сферических частиц удастся обеспечить открытую пористость с порами размером 0,5 мкм, высота подъёма расплава лития при 200 °С – 620 м.

При открытой пористости с порами размером 10 мкм высота подъёма расплава лития при 200 °С может достигать 31 м, при температуре 1000 °С – 24,2 м.

При открытой пористости с порами размером 50 мкм высота подъёма расплава лития при температуре 200 °С может достигать 6,2 м и при температуре 1000 °С – 4,8 м.

Даже при порах размером 300 мкм высота подъёма лития при температуре 200–1000 °С достигает приемлемой величины (1,0–0,8 м), что обеспечивает высокую проницаемость, и соответственно скорость подъёма.

Приведенные в табл. 3 данные для пор диаметром  $\geq 10$  мкм примерно в 2 раза превышают указанные в [3], рис. 8.1. Это свидетельствует о перспективности использования спеченных из сферических частиц порошковых капиллярно-пористых систем в качестве защитных материалов в ТЯР. В связи с тем, что согласно [7] использование несферических частиц гипотетически приводит к ещё большей высоте капиллярного поднятия жидкости, при определенной технической необходимости можно использовать также частицы вольфрама несферической формы без ухудшения гидравлических характеристик капиллярно-пористой системы, которые можно исследовать в дальнейшем. Большая высота подъёма расплава лития по порам спеченного порошкового пористого материала обеспечит надёжность подачи расплава лития на рабочую поверхность при любой необходимой толщине защитного слоя первой стенки или дивертора ТЯР. При наличии порошков вольфрама с частицами размером до 1000 мкм изготовление защитных вольфрамовых деталей ТЯР соответствующих размеров является чисто технологической задачей, для решения которой необходимо только определенное оборудование. В настоящее время уже имеются прессы и печи для изготовления вольфрамовых капиллярно-пористых защитных деталей любой формы и значительных (до 1 м) размеров.

#### Выводы

С помощью новых технологий получения частиц вольфрама размером до 1000 мкм можно существенно увеличить размеры пор в спеченных пористо-капиллярных системах и обеспечивать заданную высоту подъёма расплава лития при температуре до 1000 °С в широком диапазоне – от 0,8 до 620 м.

При этом значительно упрощается технология изготовления пористых проницаемых изделий, и обеспечиваются необходимые их прочность, жесткость и габаритные размеры.

*Обґрунтовано методикою та виконано розрахунок висоти підйому розплавленого літію по капілярах пористого матеріалу, спеченого з частинок вольфраму розміром від 1 до 1000 мкм до пористості 20–50 %. Показано, що при використанні зазначених матеріалів при температурах 200–1000 °С можна забезпечити висоту підйому розплаву літію від 0,8 до 620 м.*

**Ключові слова:** пори, рідкий літій, частки вольфраму, спечені пористо-капілярна системи.

*The technique and has been calculated lifting height of molten lithium in the capillaries of the porous material of sintered tungsten particles ranging in size from 1 to 1000 microns to 20–50 % porosity. It is shown that the use of*

these materials at temperatures of 200–1000 °C can be achieved molten lithium lift height of 0.8 to 620 m.

**Key words:** pore liquid lithium, tungsten particles, sintered porous-capillary system.

## Литература

1. Смирнов В.П. Термоядерная энергетика – крупнейший международный инновационный проект / В.П. Смирнов // Рос. Хим. журн. – 2008. – С. 79–94.
2. Люблинский И.Е. Литий в энергетическом термоядерном реакторе / И.Е. Люблинский / Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2006. – Вып. 3. – С. 3–26.
3. Даценко О.А. Перспективы использования вольфрама в термоядерных установках / О.А. Даценко, А.И. Кондрик // Сер. фізична: Ядра, частинки, поля. – Вип. 2. – Т. 46. – Вісн. Харків. Уні-ту. – № 899. – 2010. – С. 4–13.
4. Белов С.В. Пористые материалы в машиностроении / С.В. Белов– 2-е изд, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
5. Особенности восстановления вольфрама из его оксида WO<sub>3</sub> в закрытом реакторе / В.П. Бондаренко, И.В. Андреев, И.В. Савчук и др. // Сверхтвердые матер. – 2005. – № 2. – С. 35–44.
6. Бондаренко В.П. Кинетический анализ реакций восстановления WO<sub>3</sub> водородом в закрытом реакторе / В.П. Бондаренко, И.В. Андреев // Сверхтвердые матер. – 2006. – № 2. – С. 43–51.
7. Recent researches on the metal-ceramic composites based on the decamicron-grained WC / V.P. Bondarenko, I.V. Andreyev, I.V. Savchuk et all. // Int. J. of Refractory Metal. and Hard Mater. – 2013. – V. 39. – P. 18–31.
8. Активированное спекание вольфрама / С.В. Матренин, А.П. Ильин, А.И. Слосман, Л.О. Толбанова // Изв. Томск. ун-та. – 2008. – Т. 313. – № 3. – С. 83–87.
9. Алчагиров А.Б., Хоконов Х.Б. Смачиваемость поверхностей твердых тел расплавами щелочных металлов и сплавами с их участием. / А.Б. Алчагиров, Х.Б. Хоконов // Эксперимент. – 1994. – Т. 32. – Вып. 5. – С. 756–783.
10. Косторнов А.Г. О влиянии формы пор: Материаловедение дисперсных и пористых материалов и сплавов: в 2 т. / А.Г. Косторнов // Т. 2 – К.: Наук. думка. – 2003. – 550 с.

Поступила 20.05. 15

УДК 669.017.112:669.27

**І. В. Андреев**, канд. техн. наук, **В. П. Бондаренко**, член-кор. НАН України, **В. В. Мельниченко**,  
**Я. В. Мельниченко**, **С. Ф. Студенець**, **С. Є. Шейкін**, д-р. техн. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ*

## ВПЛИВ ВМІСТУ ЗВ'ЯЗУЮЧОЇ ФАЗИ НА ДЕЯКІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ ТИПУ W–Ni–Fe

*Досліджено вплив вмісту зв'язуючої фази у вольфрамовому важкому сплаві на формування його фізико-механічних властивостей. Показано, що зміна вмісту сполучної фази на 1 % (по масі) істотно впливає на властивості важкого сплаву, що може мати значення при наступному процесі деформаційного зміцнення матеріалу.*

*Ключові слова:* вольфрамовий важкий сплав типу ВНЗ (системи W–Ni–Fe), фізико-механічні властивості, спікання, відпал, холодне пластичне деформування, деформаційне зміцнення.

Сучасні дослідження природи міцності і пластичності композитів на основі вольфраму вказують на те, що на них можуть впливати багато факторів: вміст, розмір, склад і форма частинок тугоплавкої складової та зв'язки, температура, витримка, швидкість нагрівання і охолодження при спіканні та відпалі заготовок, наявність і величина зовнішніх сил [1–3].

В останній час все більш зростає необхідність отримання з таких композитів великогабаритних виробів з високою пластичністю. Це вимагає використання в композитах високого