

УДК 669.018.025

М.О. ЮРЧУК, канд.техн.наук, Інститут надтвердих матеріалів
ім. В.М.Бакуля НАН України, Київ,
І.М. ДІОРДІЦА, асис., НТУУ «КПІ», Київ

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ СЕРЕДНЬОЗЕРНИСТОГО ТВЕРДОГО СПЛАВУ ВК11 ЗА ТЕМПЕРАТУРИ ІСНУВАННЯ РІДКОЇ ФАЗИ

В статті описуються особливості формування структури твердого сплаву ВК11 за температури існування рідкої фази, сформульовані основні принципи отримання в серійних умовах двофазних твердих сплавів групи ВК з оптимальною структурою.

Ключові слова: твердий сплав, рідка фаза, структура

В статье описываются особенности формирования структуры твердого сплава ВК11 при температуре существования жидкой фазы, сформулированы основные принципы получения в серийных условиях двухфазных твердых сплавов группы ВК с оптимальной структурой.

Ключевые слова: твердый сплав, жидкая фаза, структура

This article describes the features of formation of the hard alloy ВК11 structure under the temperature of the existence of a liquid phase. Also we formulated the basic principles of obtaining two-phase solid alloy of ВК with the optimal structure in serial conditions.

Keywords: hard alloy, the liquid phase, the structure

1. Вступ

Проблема формування структури при спіканні твердих сплавів є до сих пір дискусійною. Це обумовлено тим, що на формування структури твердих сплавів впливає дуже багато суб'єктивних і об'єктивних факторів. Особливо дискусійним є механізм формування структури в процесі спікання.

Автори більшості досліджень схиляються до того, що при спіканні діють два механізми: перекристалізація через рідку фазу і коалесценція [1,2]. Так відомо з [3], що перекристалізація через газову і рідку фазу проходить з прийнятною швидкістю, тоді, коли розмір частинок менше 10^{-5} см, тобто менше 10^{-1} мкм. При виготовленні твердих сплавів вихідний розмір частинок WC складає 1-3 мкм, тобто більший від вказаного. Тому якщо процес перекристалізації і проходить, то з невеликою швидкістю.

Крім того, не зважаючи на те, що при охолодженні сплаву від лінії ліквідус механізм зародження і росту монокристалів за рахунок виділення з розплаву змінюється на механізм перекристалізації через рідку фазу, на що вказують автори [4], не встановлено за якої температури спікання твердих сплавів один механізм змінюється на інший. При цьому бездоказово є механізм зародження і росту первинних кристалів із рідкої фази. Не виключно що, при охолодженні з високих температур спікання в структурі твердих сплавів повинні з'являтися первинні кристали WC-фази, що виділяються з рідкої фази, якої при високих

температурах спікання вже існує значна кількість. Тому проблема наявності різних видів кристалів карбіду вольфраму в структурі твердих сплавів досі є дискусійною і вимагає нових досліджень.

2. Постановка задачі

Процес коалесценції частинок карбіду вольфраму (WC) може протікати тільки тоді, коли вони торкаються одна одної. В твердих сплавах це відбувається тільки тоді, коли в сплаві мало зв'язки. Тому коалесценція найбільш вірогідна для малокобальтових сплавів.

Значні недоробки є і в методичному плані. Відсутність комп'ютерів в ті часи, коли проводились дослідження процесів формування структури при спіканні твердих сплавів, не дозволяла обчислювати велику кількість зерен WC, тому при обчисленні могли бути отримані значні відхилення від дійсних величин, що могло вплинути на висновки, зроблені в розглянутих роботах.

Враховуючи значні недоліки в дослідженні процесів формування структури твердих сплавів і нові методичні можливості, була проведена робота по дослідженню впливу температури спікання кобальтового середньозернистого твердого сплаву BK11 на процес формування його мікроструктури. При цьому основну увагу було звернено на виявлення механізмів зародження, росту і перекристалізацію через рідку фазу зерен WC.

3. Методика проведення досліджень

Спікання проводили за температур 1410–1750°C, при яких в твердому сплаві вже існує рідка фаза.

В якості вихідної сировини була використана серійна порошкова суміш сплаву BK11 (СТП 00196144-0727-2004), виготовлена ВАТ «Кіровоградський завод твердих сплавів».

Підготовка суміші до пресування дослідних зразків була проведена по загально прийнятій в Україні методиці. Значення середнього розміру зерна (\bar{d}_{wc}) карбіду вольфраму у вихідній порошковій суміші складало $1,5 \pm 0,1$ мкм. Кількість загального вуглецю ($C_{заг.}$) у суміші складала 5,60 % (по масі) при стехіометричному складі 5,45 % (по масі).

Спресовані зразки спікали в дві стадії. Перша стадія – нормалізуюче спікання проводилось за $T=900^\circ\text{C}$ в прохідній печі в контрольованому газовому середовищі. Друга стадія – остаточне спікання – в електричній вакуумній печі моделі СНВЭ-1.3.1/16-ИЗ-УХЛЧ.1 за температур 1410, 1470, 1500°C і витримці 1 година. Остаточне спікання зразків за температури 1750°C і витримці 1 година провели в прохідній печі з графітовою трубою в середовищі водню.

Стереологічні параметри структури сплаву визначали по шліфах зразків (шліфи робилися на торцях зразків). Обстеженню піддавали приблизно 2000 зерен карбіду вольфраму на шліфу в 16 точках зразка сплаву. Загальна площа знімків структури на зразку сплаву склала 80320 мкм². Фотографування структури сплаву проводили на оптичному мікроскопі МІМ-8 із збільшенням у 1350 разів з імерсійним (кедровим) маслом цифровою камерою С-120 DC6V.

Розрахунок параметрів структури проводили на комп'ютері за допомогою програми Scion Image. Попередньо зерна карбіду вольфраму обводили на комп'ютері вручну. В результаті обробки одержували наступні мікроструктурні

параметри сплавів з точністю в середньому до 2%: середнього розміру зерна карбиду вольфраму (\bar{d}_{WC}) мкм, питомої поверхні міжфазних границь ($\sum S_{WC-C_0}$) мкм²/мкм³, питомої поверхні міжкарбідних границь ($\sum S_{WC-WC}$) мкм²/мкм³, середнього умовного розміру товщини прошарку кобальтової фази (\bar{L}_{C_0}) мкм, відносної частки контактної поверхні (C_{WC-WC}) — коефіцієнта суміжності і коефіцієнта варіації (V).

4. Результати дослідження і їх обговорення

З фрагментів структури сплаву рис. 1, отриманих за різних температур спікання, можна зробити висновок, що за температури 1410°C в сплаві присутні три типи структурних елементів карбідної фази: досконало огранені невеликі одиночні зерна WC, недосконалої форми незначно крупніші „хмаркоподібні” утворення і досконало оформлені більш крупні окремі зерна WC. При цьому слід відмітити, що „хмаркоподібні” утворення складаються з кількох недосконало сформованих зерен WC, тобто периметр таких зерен і утворень має хвилясту форму. На ньому є кілька виступів і впадин. Границі між зернами WC у „хмаркоподібних” утвореннях вирізняються по різному. В деяких випадках їх можна навести з більшою або меншою імовірністю. В такому разі можна стверджувати, що „хмаркоподібні” утворення є мікроагрегатами зерен WC, які утворилися в сплаві після завершення ущільнення при появі в об’ємі сплаву рідкої фази. За температури 1410°C, такі мікроагрегати мають певні розміри. При підвищенні температури спікання до 1470°C вони збільшуються у розмірах. В указаному інтервалі температур (1410–1450°C) поступово збільшуються в розмірах і досконало ограновані зерна WC. Особливо крупних зерен в цьому інтервалі температур ще не спостерігається. Лише за температури 1470°C (рис. 1б) починають з’являтися окремі великі зерна. При цьому кількість „хмаркоподібних” утворень різко зменшується, а ті, що залишилися, мають крупні розміри. Очевидно, при підвищенні температури від 1410°C до 1470°C мікроагрегати за рахунок коалесценції перетворюються в більш крупні зерна WC, які потім придбають досконалу огранку. При подальшому збільшенні температури спікання до 1500°C з’являються зерна WC аномально крупного розміру. При цьому за температури спікання 1500°C в структурі майже відсутні зерна чи скупчення зерен, що не мають правильної огранки. В структурі сплаву, спеченого при температурі 1750°C, присутня велика кількість аномально крупних зерен, але збереглося і багато дрібних досконало огранених зерен WC.

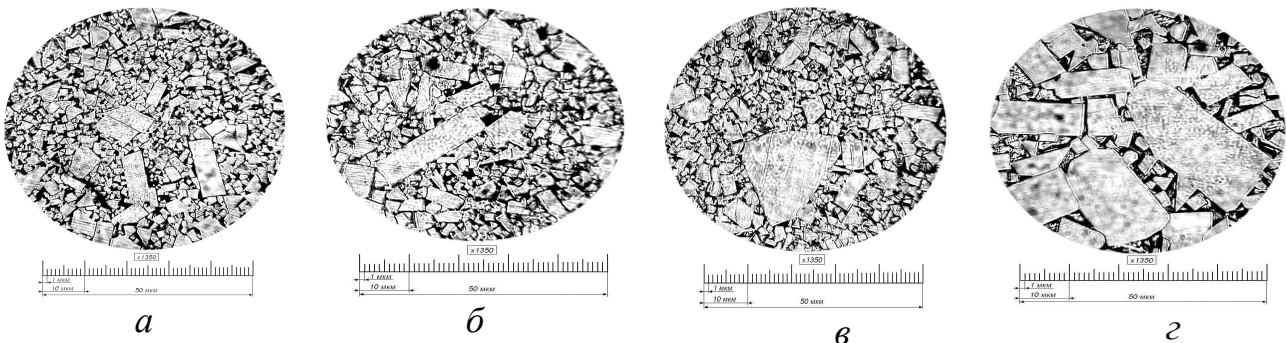


Рис. 1. Структура сплаву WC11, спеченого за: а–1410°C; б–1470°C; в–1500°C; з–1750°C

На відміну до малокобальтових сплавів ВК3 та ВК6 [5, 6] у сплаві ВК11 збільшення кількості як аномально крупних зерен так і зерен основної фракції відбувається більш плавно. Важливо відмітити, що найменша кількість зерен правильної геометричної фігури в сплаві спостерігається за температури спікання 1410°C, рис. 1а, а найбільш досконалу, за температури спікання 1750°C (рис. 2), але при цьому в сплаві присутня значна кількість аномально крупних зерен WC.

За вказаних температур спікання в сплаві отримуємо направлений характер зміни в двох складових розподілу перерізів зерен WC. Кількісний аналіз розподілу перерізів зерен WC показано в табл. 1.

Таблиця 1. Розподіл поперечних перерізів досконало сформованих зерен WC, розміром понад 5 мкм, твердого сплаву ВК11, спеченого за різних температур

Температура спікання, °C		1410	1470	1500	1750
Розміри перерізів зерен WC, мкм:	безперервного спектру	17	17	18	37
	аномально крупні	19–24	20–30	20–31	39–46

Незначне зростання значень середнього розміру перерізів зерна WC та товщини прошарків кобальту у сплаві спостерігається за температури 1410–1500°C і суттєве за температури 1750°C. В той же час на всьому діапазоні температур від 1410°C до 1750°C спостерігається незначне зростання значення коефіцієнту варіації (рис. 3).

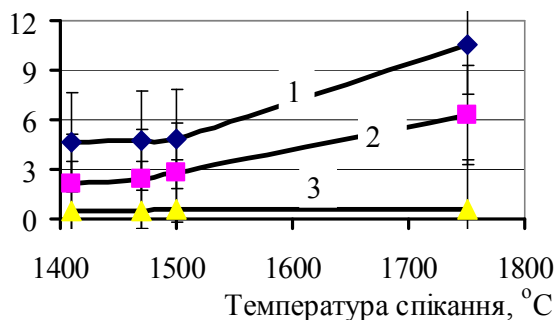


Рис. 3. Залежності за температури спікання: 1–середнього розміру \bar{d}_{WC} зерен WC; 2–товщини прошарків кобальту; 3–коефіцієнту варіації перерізів зерен WC сплаву ВК11

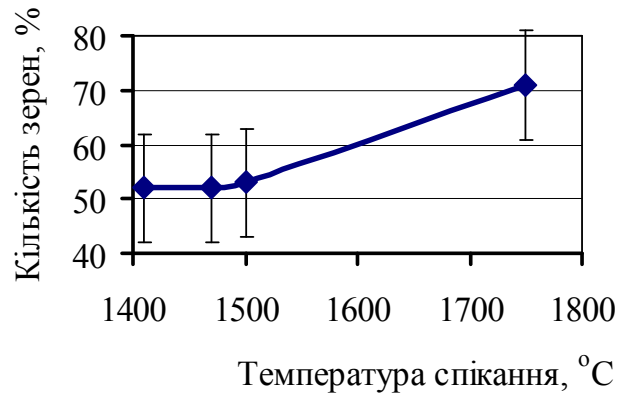


Рис. 2. Залежність кількості досконало сформованих зерен WC розміром понад 5 мкм за температури спікання у структурі твердого сплаву ВК11

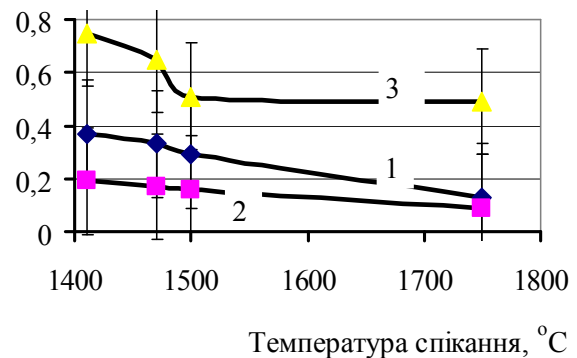


Рис. 4. Залежності за температури спікання: 1–площі питомої поверхні міжкарбідних границь; 2–міжфазних границь; 3–коефіцієнту суміжності зерен WC сплаву ВК11

Такі структурні характеристики, як площі питомої поверхні міжкарбідних та міжфазних границь і коефіцієнт суміжності зерен WC зменшуються з підвищенням температур спікання (рис. 4).

Аналіз структурних характеристик сплаву за нетравленими шліфами та визначення на травлених шліфах величини зерен вказують на те, що з підвищенням температур спікання спостерігається зріст розмірів зерен WC. Вміст включень вільного вуглецю в структурі спеченого сплаву наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Структурні характеристики твердого сплаву BK11, спеченого за різних температур

Температура спікання, °С		1410	1470	1500	1750
Кількість пор розміром	до 50мкм, %	Д-1 0,1	В-2 0,2	Д-2 0,2	0,3
	50–100мкм	–	73	54, 73, 109	54, 183, 205
Розподіл перетинів зерен WC за розмірами на шліфах сплаву, %	1,0мкм	54	45	38	21
	2,0мкм	19	20	14	15
	3,0мкм	18	16	15	11
	4,0–5,0мкм	5	8	15	20
	6,0–7,0мкм	3	8	11	16
	8,0–10,0мкм	1	2	3	7
	11,0–15,0мкм	–	–	3	4
	16,0–20,0мкм	–	1	1	3
	20,0мкм	–	–	–	3
Ширина прошарків в 10 полях зору кобальтової фази, мкм		0,5–1,0	0,5–1,0–2	0,5–1,0–2	0,5–1,0–2 *р. 3
Максимальний розмір зерен WC в одному полі зору, мкм		–	–	20	30
Вміст включень вільного вуглецю, % (по об'єму)		–	0,1 по краю	0,5 рідко	0,3–0,5 по всій поверхні

Примітка: *р. – рідко.

Дослідження вмісту вільного вуглецю у структурі сплаву визначених за нетравленими шліфами зразка (табл. 2) підтверджуються проведеним дослідженням по виявленню вільного вуглецю в структурі сплаву на нових зламах зразків, рис. 5.

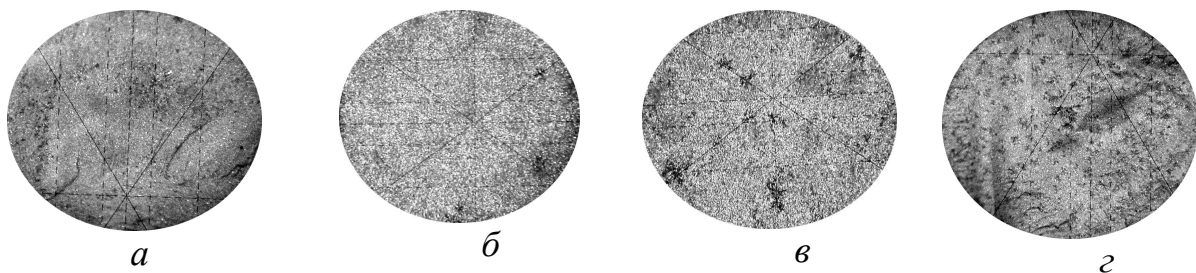


Рис. 5. Фрактографія структури сплаву BK11 спеченого за: а–1410°С; б–1470°С; в–1500°С; з–1750°С

Вміст загального вуглецю в суміші сплаву склав $5,7 \pm 0,1$. Крихкої η_1 -фази в складі сплаву не виявлено.

Дані про характер росту зерен WC свідчать про те, що за температури 1410°C переважно проходять процеси удосконалення огранки окремих зерен WC і формування безформних "хмаркоподібних" скупчень мікрокристалітів WC за рахунок коагуляції. Останні мають значну кількість вгнутих місць на периметрі скупчення. Але ці скупчення ще можна розділити на окремі дрібніші зерна. Можна вважати, що збільшення кількості рідкої фази в сплаві відповідно до діаграми WC-Co при підвищенні температури від 1410 до 1470°C полегшує ковзання частинок WC одна відносно одної і вони під дією сили гравітації в окремих мікронах сплаву більш щільно упаковуються. В місцях контактування двох частинок буде відбуватися розчинення WC в розплаві і осадження на вільних поверхнях зерен WC. В результаті частинки будуть наближатися одна до одної, а площа поверхні контактів WC-WC збільшуватися. Ці дані вказують на те, що в даному інтервалі температур дифузійні процеси локалізовані біля границь зерен WC. Відбувається розчинення вільних виступів, виступів, що контактують з протилежним зерном, дефектних ділянок зерен і відкладення розчинених атомів на більш рівноважних ділянках зерен. Це призводить до того, що зерна WC набувають все більш рівноважної форми. При цьому спостерігається згрупування зерен WC і формування їх скупчень, хоча товщина прошарків Co мало змінилася, оскільки при зменшенні товщини прошарків в середині агломерату збільшуються прошарки кобальту між агломератами. В той же час величина коефіцієнту суміжності більш реагує на цей процес (рис. 4). Таким чином, на підставі викладеного вище можна зробити висновок, що в сплаві BK11 за температури 1410°C механізм росту зерен за допомогою перекристалізації через рідку фазу практично не проявляється.

За температури 1470°C вже активно проходить процес коалесценції частинок WC, які знаходяться в скупченнях. При цьому кількість безформних мікроагрегатів зерен WC різко зменшується, а кількість досконало огранованих зерен збільшується. Збільшуються також розміри перерізів зерен WC, але говорити про значну зміну процесу росту зерен WC ще не можливо. Цей процес активізується за температури 1500°C , коли на розподілі зерен WC за розмірами виникають аномально крупні зерна WC.

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що за 1470°C проходить в основному процес коалесценції в мікроагрегатах зерен WC. Механізм збільшення кількості аномальних зерен WC за температури спікання 1500°C поки що не встановлено. В літературі [7] наведено кілька можливих причин цього явища, але поки що точних доказів не отримано. Для більш доказових висновків необхідно провести спікання при більш високих температурах і з більшим вмістом кобальту. Але можна вказати на те, що при спіканні сплаву BK11 за температури 1410 – 1500°C проявляється три механізми: перекристалізація через рідку фазу в зернах WC, яка приводить до поліпшення огранки і зближення зерен WC; коалесценція зерен в мікроагрегатах з формуванням досконало огранених зерен WC крупного розміру і невідомий механізм виникнення аномально крупних зерен WC. Ці механізми виникають переважно послідовно один за другим і

можуть частково накладатися один на другий. При підвищенні температури спікання швидкість цих процесів зростає і тому за 1 годину при більш високій температурі спостерігається більш повне проявлення високотемпературного процесу в послідовності: перенесення через рідку фазу в частинках WC → зближення частинок одна до одної за рахунок сил гравітації → формування мікроагрегатів за рахунок коагуляції → коалесценція в середині мікроагрегатів → виникнення аномально крупних зерен шляхом виділення їх з рідкої фази при охолодженні сплаву.

Зростання аномальних зерен поки що важко оцінити навіть з позицій теорії різнозернистості [8]. Тому можна вважати, що аномально крупні зерна WC виділяються з рідкої фази.

5. Висновки

У сплаві BK11 в достатньо вузькому інтервалі температур ряд розподілу перерізів зерен WC має неперервний спектр і окремі аномальні крупного розміру зерна, рис. 1, 2, табл. 1. Значення \bar{d}_{WC} та \bar{L}_{Co} мало зростають в сплаві до $T_{сп} = 1500^\circ\text{C}$ і стрімко зростають за температури 1750°C (рис. 3). Коефіцієнт варіації значень перерізів зерен WC сплаву безперервно зростає на всьому діапазоні температур спікання. Питома поверхня міжкарбідних, міжфазних границь та коефіцієнт суміжності зерен WC сплаву (рис. 4) мають аналогічний характер змін \bar{d}_{WC} , \bar{L}_{Co} та коефіцієнту варіації, але в бік зниження значень.

По виявлених окремих механізмів формування структури можна стверджувати наступне.

1. Встановлено температурні границі механізмів формування структури при спіканні твердого сплаву BK11: за температури 1410°C діють механізми, що призводять до утворення зерен WC рівноважної форми за рахунок переносу атомів W і C через рідку фазу в окремих зернах WC і утворення скупчень (мікроагрегатів) дрібних зерен WC, які зв'язані між собою у вигляді ланцюжків, арок, а за температури $1470\text{--}1500^\circ\text{C}$ реалізується механізм коалесценції зерен WC в їх скупченнях з дрібних зерен рівноважної форми.

2. За температури 1500°C більше проявляється зростання аномально крупних зерен WC, але таких зерен мало і вони не створюють окремого розподілу їх за розмірами. Для виявлення механізму росту цих зерен необхідно провести дослідження при більш високих температурах і вмісту Co.

3. На основі проведених досліджень сформульовані основні принципи отримання в серійних умовах двофазних твердих сплавів групи BK з оптимальною структурою: для отримання сплаву BK11 однорідною структурою з зернами WC досконалої огранки, необхідно спікати за температури 1410°C , для отримання сплаву з наявністю аномально крупних зерен необхідно спікати за температури 1500°C .

Список літератури: 1. *Gopal S. Cemented tungsten carbides. Indian Institute of Technology. /Uradhyaya. – Kanpur. 1998. – 403 p.* 2. *Бондаренко В.П.* Спекание вольфрамовых твердых сплавов в прецизионно контролируемой газовой среде [Текст] : учеб / Павлоцкая Э. Г. – К. : Наук. думка, 1995. – 204 с. 3. *Физическая энциклопедия [Текст]: довідник / Гл. ред. А. М. Прохоров – М.: Сов. Энциклопедия. – 1990. – 703 с.* 4. *Лившиц М.М.,* О кинетике

диффузионного распада пересыщенных твердых растворов [Текст] /Слезов В.В. // Экспериментальная и теоретическая физика. – 1998. - № 1.– С. 56-67. 5.М.О. Юрчук. Особливості формування структури середньозернистого твердого сплаву ВК3 при температурах існування рідкої фази [Текст] : сб. науч. тр. //Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр.–2008.– Вып. 11.–С. 331 - 336. 6.М.О. Юрчук. Особливості формування структури середньозернистого твердого сплаву ВК6, спеченого за температури існування рідкої фази. [Текст]: сб. науч. тр. //Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения –2010.– Вып. 13.–С. 543 – 550. 7.Ехнер Н.Е. Physical and chemical nature of cemented carbides // International metals reviews. – № 4. – Р. 149 – 173.8.Горелик С.С. [Текст] / Рекристаллизация металлов сплавов. М.: Металлургия, 1967–404 с. *Поступила в редколлегию 15.02.2012*

УДК 539.3

Н.В.ШИРЯЕВА, ст. преп., НТУ «ХПИ», Харьков,
К.В.АВРАМОВ, докт. техн. наук, проф., ИПМАШ им. А. Н. Подгорного,
Харьков,
Д.В.БРЕСЛАВСЬКИЙ, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ», Харьков,
О.С. ГАЛАС, ст. преп., НТУ «ХПИ», Харьков

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАСТИ ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

У статті наведено чисельний аналіз нелінійних коливань лопаті повітряної енергетичної установки. Показано, що центр тяжіння та центр зсуву знаходяться у різних точках, тому згинні та крутильні коливання пов'язані між собою. За розрахунками встановлено, що спектр вільних власних частот таких лопатей є досить щільним, самі частоти є дуже низькими. Вільні нелінійні коливання було досліджено за допомогою нелінійних нормальних форм Шоу-П'єра.

В статье приведен численный анализ нелинейных колебаний лопасти ветровой энергетической установки. Показано, что центр тяжести и центр сдвига находятся в разных точках, потому изгибные и крутильные колебания связаны между собой. В результате расчетов установлено, что спектр свободных частот довольно-таки тесный, а сами частоты очень низкие. Свободные нелинейные колебания исследовались с помощью метода нелинейных нормальных форм Шоу-Пьера.

Numerical analysis of rotating blade of wind power system is presented in the paper. It was established that the center of gravity and the shear center are located in different points. That's made flexural and torsional vibrations to be coupled. Calculations showed that spectrum of free eigenfrequencies of such blades is quite compact, and frequencies are very low. Free nonlinear oscillations are investigated by Shaw-Pierre method.

Введение. Ветровые установки используются человеком в течение длительного времени. Энергия ветра является одним из приоритетных альтернативных источников электроэнергии, поскольку не несет вреда окружающей среде и никогда себя не исчерпает. Размер современных ветрогенераторов имеет широкий диапазон: от малых 100 кВт-ных, предназначенных для обеспечения электроэнергией отдельных домов или коттеджей, до огромных установок мощностью более 1 МВт, диаметр лопастей которых превышает 50 м. Установка мощных стационарных ветрогенераторов требует предварительных исследований и проведения ряда электромонтажных,