

Ссылка на статью

// Машины и Установки: проектирование, разработка и эксплуатация.

МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Электрон. журн. 2015. № 06. С. 63–70..

DOI: [10.7463/aplts.0615.0829658](https://doi.org/10.7463/aplts.0615.0829658)

Представлена в редакцию: 12.11.2015

Исправлена: 26.11.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 669.715'24

## Исследование влияния высокотемпературной термической обработки на фазовый и химический состав сплава ВКНА-1В

Унчикова М. В.<sup>1,\*</sup>, Костенко Ю. В.<sup>1</sup>,  
Базылева О. А.<sup>2</sup>, Аргинбаева Э. Г.<sup>2</sup>,  
Туренко Е. Ю.<sup>2</sup>

\* [yhoji@yandex.ru](mailto:yhoji@yandex.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>Всероссийский Научно-Исследовательский Институт  
Авиационных Материалов, Москва, Россия

---

Проведено исследование фазового и химического состава интерметаллидного сплава ВКНА-1В в исходном литом состоянии (вакуумная индукционная выплавка и вакуумный индукционный переplав) и после различных режимов высокотемпературной термической обработки. Определены пределы кратковременной прочности и текучести на образцах сплава ВКНА-1В и проведена корреляция значений механических свойств с фазово-химическим составом. Установлено, что высокотемпературная термообработка, изменяя соотношение  $\gamma'/\gamma$ -фаз, практически не влияет на стабильность карбидной фазы, что и отражается на стабильности кратковременных свойств интерметаллидного сплава на основе соединения Ni<sub>3</sub>Al при комнатной температуре.

**Ключевые слова:** интерметаллидный сплав, карбиды, термическая обработка, фазовый состав, химический состав, предел кратковременной прочности, предел текучести

---

### Введение

Интерметаллидные сплавы на основе алюминидов никеля – материалы, перспектива применения которых активно обсуждается не первое десятилетие. ФГУП «ВИАМ» разработана серия сплавов марок ВКНА и ВИН. Эти сплавы работоспособны при температурах 1100-1200°С. Повышенная термостабильность упомянутых сплавов связана с соединением Ni<sub>3</sub>Al, которое является фазой с упорядоченной структурой, имеющей положительную температурную зависимость напряжения течения и высокую энергию активации диффузии [1]. Для обеспечения высокого уровня жаропрочности интерметаллидных сплавов

требуется в 1,8-1,5 раза меньшее количество тугоплавких элементов, чем в никелевых суперсплавах [2].

Для нивелирования низкотемпературной хрупкости легирование интерметаллидных сплавов на основе Ni<sub>3</sub>Al осуществляется с таким расчетом, чтобы в сплаве наряду с  $\gamma$ -Ni<sub>3</sub>Al присутствовало ~10-15% (об.)  $\gamma$ -твердого раствора с неупорядоченной кристаллической ГЦК-решеткой. Это обеспечивает интерметаллидным сплавам удовлетворительную пластичность при растяжении при комнатной температуре ( $\delta$ ~5-10%), поскольку деформация протекает в объеме зерен и дислокации перемещаются по вязким  $\gamma$ -прослойкам [3].

Традиционно, для экономно легированных интерметаллидных сплавов на основе алюминидов никеля применяется термическая обработка для снижения объёмных литейных и поверхностных напряжений после механической обработки. В данной статье авторы приводят результаты исследований высокотемпературной обработки на фазовый состав, структуру и свойства сплава ВКНА-1В.

### Материалы и методика исследований

Сплав ВКНА-1В выплавляли в вакуумной индукционной печи [4]. Мерные шихтовые заготовки переплавляли методом направленной кристаллизации на установке УВНС-4 [5].

Химический состав исследуемого сплава приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемого сплава

Сплав	Химический состав сплава, масс.%							
	Ni	Al	Cr	Mo	W	Ti	Hf	C
ВКНА-1В	Осн.	8,6	5,4	3,6	3,2	1,54	0,35	0,04

Для термической обработки, включающей нагрев до 1200, 1290, 1300 °С, выдержку в течение 100, 4, 4 ч соответственно, охлаждение с печью до 800°С, далее – на воздухе, использовали камерную печь VEBKS400/100 с максимальной рабочей температурой 1350 °С. Образцы загружались в предварительно разогретую печь с температурой, не превышающей 800 °С.

Для исследования фазового состава применяли метод физико-химического фазового анализа, основанного на электрохимическом изолировании фаз в различных электролитах [6]. Определяли количество изолированных фаз (карбидов, интерметаллидов) и их химический состав с использованием химического и рентгеноструктурного метода анализа. Микроструктуру исследовали на растровом электронном микроскопе JSM-840.

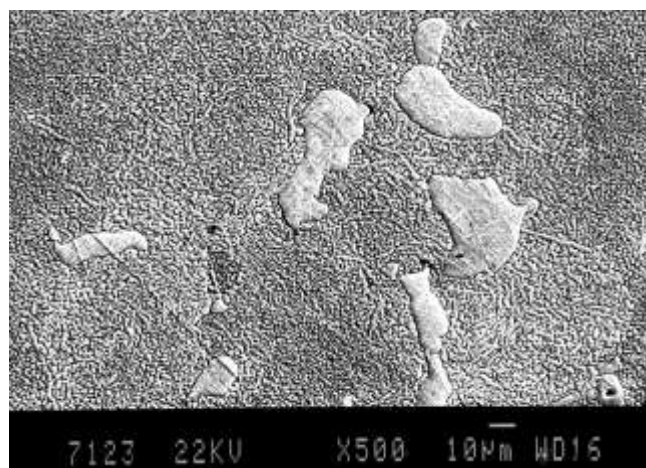
### Результаты исследований и их обсуждение

В таблице 2 приведен химический состав сплава ВКНА-1В в литом состоянии и после различных режимов высокотемпературной термической обработки, оценен также состав карбидов.

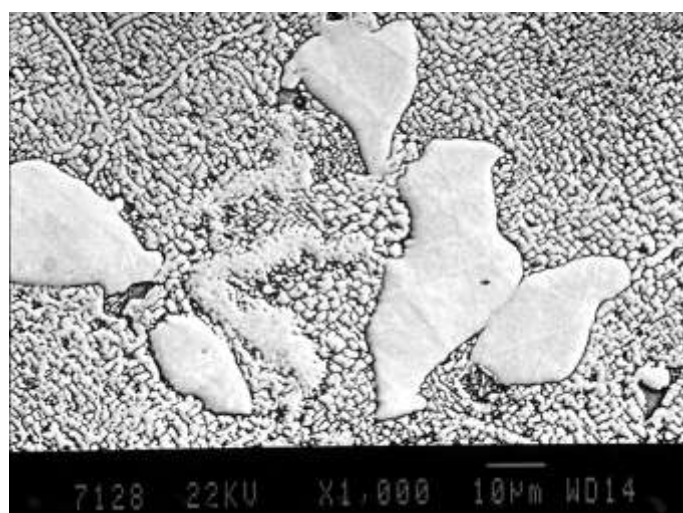
Таблица 2. Содержание элементов в сплаве, в карбидах в литом состоянии и после термической обработки

Состояние сплава	Химический состав сплава, масс. %								Содержание элементов в карбидах к массе сплава, масс. %						Фазовый состав
	Ni	Al	Cr	Mo	W	Ti	Hf	C	Ni	Cr	Mo	W	Ti	Hf	
Литое, без т/о	Осн.	8,6	5,4	3,6	3,2	1,54	0,35	0,04	0,06	0,07	0,12	0,04	0,04	0,04	HfC <sub>сл.</sub> ; TiC <sub>сл.</sub> ; Mo <sub>2</sub> C <sub>сл.</sub>
1200°C, 100 ч	Осн.	8,7	5,2	3,35	2,93	1,47	0,5	0,01	0,06	0,04	Сл.	-	Сл.	Сл.	-
1290°C, 4 ч	Осн.	8,7	5,2	3,35	2,93	1,47	0,5	0,01	0,06	0,05	-	-	-	-	-
1300°C, 4 ч	Осн.	8,7	5,2	3,35	2,93	1,47	0,5	0,01	0,13	0,07	0,07	0,04	0,01	0,01	Mo <sub>2</sub> C <sub>сл.</sub> ; HfC <sub>сл.</sub>

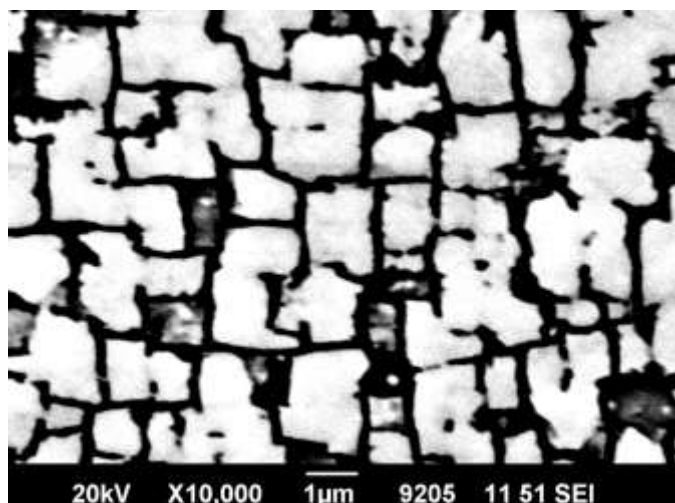
Микроструктура сплава ВКНА-1В после направленной кристаллизации имеет ячеисто-дендритное строение (рис.1). В осях дендритов находится  $\gamma'$ -фаза (~75-80% об.), окружённая вязкой  $\gamma$ -фазой в виде тонких прослоек, в междендритных участках расположены крупные частицы  $\gamma'$ -фазы.



а)



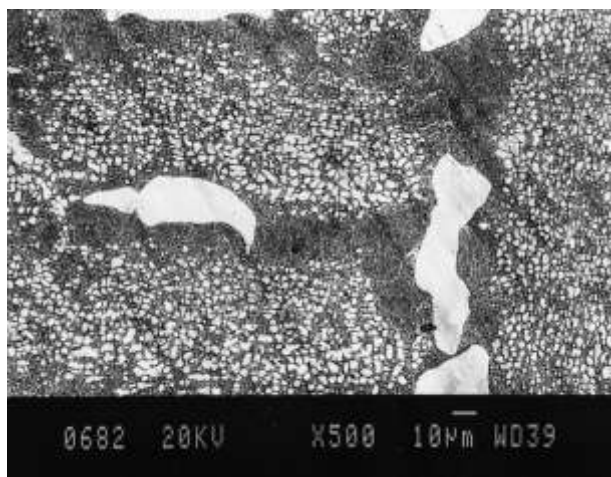
б)



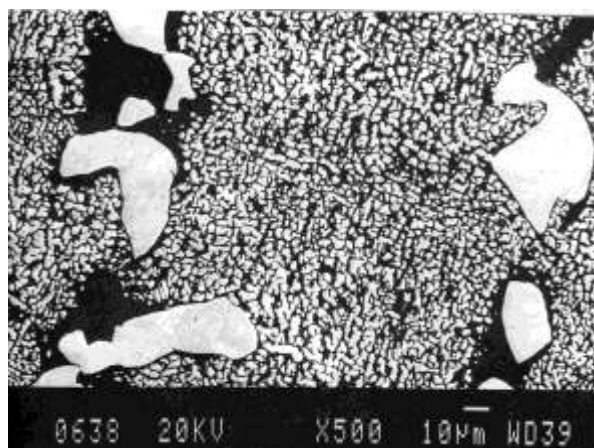
в)

**Рис.1.** Литое исходное состояние сплава ВКНА-1В (ВИ+ВИ): а) x500; б) x1000; в) x10000

На рисунках 2-4 представлена микроструктура образцов сплава после термической обработки по исследуемым режимам.

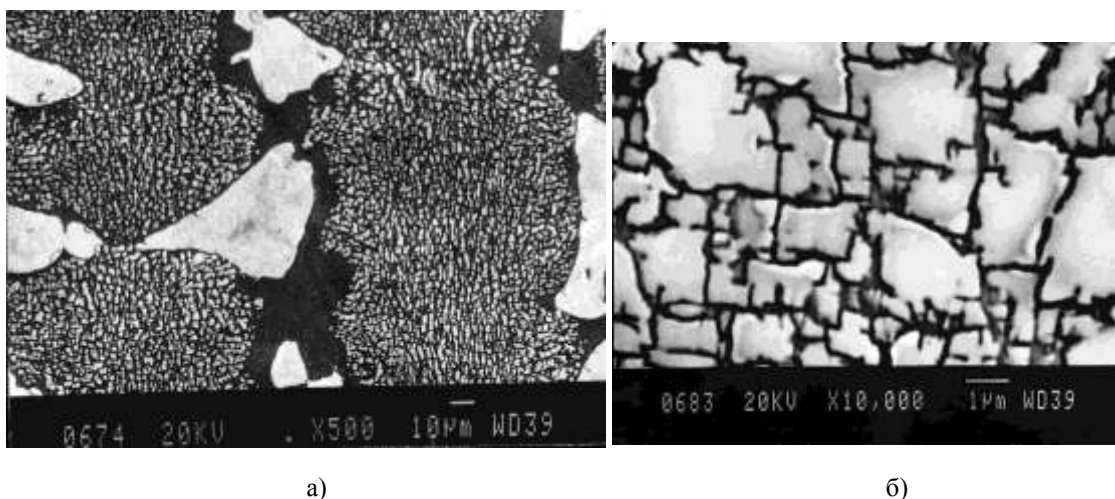


**Рис.2.** Микроструктура сплава ВКНА-1В после термической обработки  $t=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau=100\text{ ч}$



**Рис.3.** Микроструктура сплава ВКНА-1В после термической обработки  $t=1290\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau=4\text{ ч}$





**Рис.4.** Микроструктура сплава ВКНА-1В после термической обработки  $t=1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau=4\text{ч}$ : а)  $\times 500$ ; б)  $\times 10000$

Анализ микроструктуры показал, что с увеличением температуры термической обработки происходит укрупнение частиц  $\gamma'$ -фазы в междендритных областях (см. рис.1в и 4б). Анализ результатов исследований, представленных в таблице 1 и на рисунках 1-4, дают основания полагать, что интерметаллидный сплав ВКНА-1В термически стабилен. Высокотемпературная обработка по указанным выше режимам практически не влияет на структуру сплава. Сопоставив результаты химического состава сплава после литья и термической обработки, можно сделать вывод о том, что карбиды  $\text{Mo}_2\text{C}$  и  $\text{HfC}$ , выделяющиеся в следовых количествах, и расположенные, как правило, по границам фаз, стабильны.

Далее образцы сплава ВКНА-1В были подвержены испытаниям на растяжение при комнатной температуре с определением характеристик кратковременной прочности (табл. 3).

**Таблица 3.** Механические свойства сплава после термической обработки

Наименование характеристики	Литое состояние	Температура термической обработки, $^{\circ}\text{C}$		
		1200	1290	1300
		Время выдержки при нагреве, ч		
Предел прочности, $\sigma_{\text{в}}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	71,0-74,0	75,0-78	73,5-78,0	80,0-83,0
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	36,0-38,0	36,0-40,0	32,0-33,0	40,0-41,0

### Заключение

Интерметаллидный сплав ВКНА-1В термически стабилен. Увеличение размера ячеек  $\gamma'$ -фазы в осях дендритов приводит к росту кратковременной прочности сплава при комнатной температуре.

## Список литературы

1. Аристова Е.Ю., Белова Е.Н., Бондаренко Ю.А., Бунтушкин В.П., Гинзбург С.С., Каблов Е.Н., Нефедов В.Г., Разумовский И.М. Самодиффузия никеля по внутренним поверхностям раздела в жаропрочном сплаве на основе сложнелегированного интерметаллида  $Ni_3Al$  // *Металлы*. 1996. № 3. С. 113-120
2. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 57-60.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. Сер. Машиностроение. 2011. Спец. вып. «Перспективные конструкционные материалы и технологии». С. 13–19.
4. Каблов Е.Н., Базылева О.А., Воронцов М.А. Новая основа для создания литейных высокотемпературных жаропрочных сплавов // *МиТОМ*. 2006. №8. С. 21-25.
5. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Высокотемпературные интерметаллидные сплавы для деталей ГТД // *Авиационные материалы и технологии*, 2013, № 3. С. 26-31.
6. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е., Горюнов А.В. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 97-105.
7. Горюнов А.В., Ригин В.Е. Современная технология получения литейных жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №2. С. 3–7.
8. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Каблов Д.Е. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных и интерметаллидных сплавов с монокристаллической структурой // *Вестник МГТУ*, Серия: Машиностроение. 2011. Спец. вып. С. 20–25.
9. Лашко Н.Ф., Заславская Л.В., Козлова М.Н., Морозова Г.И., Сорокина К.П., Яковлева Е.Ф. Физико-химический фазовый анализ сталей и сплавов. М.: *Металлургия*, 1978. 336 с.

## Research of High-Heat Treatment Effect on Phase and Chemical Composition of the VKNA-1V Alloy

M.V. Unchikova<sup>1,\*</sup>, Yu.V. Kostenko<sup>1</sup>,

[\\*yhoji@yandex.ru](mailto:yhoji@yandex.ru)

O. A. Bazyleva<sup>2</sup>, Arginbaeva E. G. Arginbaeva<sup>2</sup>,

E. Y. Turenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials,  
Moscow, Russia

---

**Keywords:** intermetallic alloy, carbides, heat treatment, phase composition, chemical composition, tensile short-term strength, yield strength

---

The paper dwells on the features of the chemical composition and structure of alloys based on Ni3Al. It examines the effect of heat treatment on the structure and phase parameters and on the short-term strength of the intermetallic VKNA-1B alloy.

Smelting bar stock was made by technique of vacuum induction. A directional solidification method was used to provide heat treatment of samples on the UVNS-4 installation.

The heat treatment was performed in the following modes: heating to a temperature of 1200, 1290, 1300 °C, holding for 100, 4, 4 hours, respectively, furnace cooling to 800 °C, then air-cooling. For heating was used the batch furnace VEBK S 400/100 with a maximum operating temperature of 1350 °C. Samples were loaded in the furnace at 800 °C.

The phase composition of the VKNA-1B alloy was examined through physicochemical analysis based on electrochemical insulating phases in different electrolytes. The composition and quantity of the isolated phases were determined by the results of X-ray and chemical analysis methods.

To analyse the microstructure was used a scanning electron microscope JSM-840. In original cast state the VKNA-1B alloy has a cellular-dendritic structure. In the axes of the dendrites there is a  $\gamma'$ -phase (~ 75-80% vol.) surrounded by a viscous  $\gamma$ -phase in the form of thin layers; in the inter-dendritic regions there are large particles of  $\gamma'$ -phase. The increasing temperature of heat treatment comes with coarsening  $\gamma'$ -phase particles in inter-dendritic regions and, essentially, has no effect on the phase composition of the alloy. Results of mechanical tensile tests have shown that the alloy retains high strength values after long-term exposure and the increasing cell size of  $\gamma'$ -phase in the axes of the dendrites when raising the temperature leads to an increase in short-term strength of the alloy.

## References

1. Aristova E.Yu., Belova E.N., Bondarenko Yu.A., Buntushkin V.P., Ginzburg S.S., Kablov E.N., Nefedov V.G., Razumovskii I.M. The self-diffusion of Nickel on the internal surfaces of section in heat-resistant alloy based composite-alloyed intermetallide Ni<sub>3</sub>Al. *Metally = Metals*, 1996, no.3, pp.113-120. (in Russian).
2. Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Turenko E.Yu. High-temperature casting intermetallic alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*, 2012, no.S, pp. 57-60. (in Russian).
3. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materials for vysokotemperaturnykh parts of gas turbine engines. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering*, 2011, Special edition. pp.13-19. (in Russian).
4. Kablov E.N., Bazyleva O.A., Vorontsov M.A. A new basis for establishing a foundry heat-resistant alloys high-temperature. *Materialovedenie i termicheskaya obrabotka materialov = Metal Science and Heat Treatment*, 2006, no.8, pp.21-25. (in Russian).
5. Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Turenko E.Yu. The high-temperature intermetallic alloys for parts of gas-turbine engines. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*, 2013, no.3, pp. 26-31. (in Russian).
6. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin V.E., Goryunov A.V. Present-Day Production Technologies of Rod Billets, Made of Casting Superalloys of New Generation. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*, 2012, no.S, pp. 97-105. (in Russian).
7. Goryunov A.V., Rigin V.E. The modern technology of cast nickel base superalloys production. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*, 2014, no.2, pp. 3-7. (in Russian).
8. Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A., Kablov D.E. The development process of directional solidification of GTE blades from high-temperature, intermetallic alloys with monocrystalline structure. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering*, 2011, Special edition. pp.20-25. (in Russian).
9. Lashko N.F., Zaslavskaya L.V., Kozlova M.N., Morozova G.I., Sorokina K.P., Yakovleva E.F. *Fiziko-khimicheskii fazovyi analiz stalei i splavov* [Physicochemical phase analysis of steels and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 336 p. (in Russian).