

УДК 669.24.002.8:621.74.045

**В. В. КЛОЧИХИН¹, Н. А. ЛЫСЕНКО¹, Е. В. МИЛОНИН¹,
Я. А. БЕРЕСТОВОЙ¹, В. В. НАУМИК²**¹ *АО "Мотор Сич", Запорожье, Украина*² *Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина*

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛА ЗАТРАВОК ДЛЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЛИТЬЯ

Известно, что чистота затравочного сплава НВ-4 по химическому составу и неметаллическим включениям во многом определяет качество изготавливаемых монокристаллических лопаток для авиационных двигателей, а дополнительное введение в него углерода предотвращает поверхностное окисление затравок и способствует формированию совершенной структуры отливок. Изучено качество материала затравок из сплава НВ-4 с дополнительным содержанием углерода в количестве до 0,1 %. Выявлены перспективные направления усовершенствования технологии получения ответственных деталей авиационного машиностроения.

Ключевые слова: *затравочный сплав НВ-4, химический состав, макроструктура, микроструктура.*

Анализ состояния вопроса

Для производства литых лопаток газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов с направленной и монокристаллической макроструктурой широко применяется метод высокоскоростной направленной кристаллизации с использованием стартовых затравок [1]. При выращивании монокристаллических лопаток по методу Бриджмена – Стокбаргера их качество во многом зависит от степени структурного совершенства используемых при этом затравок – монокристаллов сплава НВ-4, номинально содержащего 35 % W с допускаемым согласно ТУ1-92-112-87 содержанием примесей.

Известно [2], что введение в состав затравочно-го сплава НВ-4 углерода, являющегося активным восстановителем, в количестве до 0,1 % препятствует его поверхностному окислению в процессе нагрева формы под заливку, что обеспечивает хороший контакт расплав – затравка, нормальное смачивание поверхности и частичное растворение торца затравки, а в результате препятствует фрагментации растущего монокристалла и способствует формированию совершенной структуры отливки.

На сегодня принята технология изготовления затравок на установках типа УВНК-9А с применением жидкометаллического алюминиевого кристаллизатора.

Критическое значение скорости кристаллизации и стабильность плоского фронта при получении монокристаллических отливок очень сильно зависят от наличия в сплаве НВ-4 примесей Fe, Si, S и P, с

чем связаны требования к чистоте данного сплава для обеспечения структурного совершенства литых затравок используемых при изготовлении монокристаллических лопаток.

Установлено [3], что структурное совершенство растущего монокристалла зависит от градиента температуры, скорости кристаллизации и концентрации легирующих элементов в расплаве перед фронтом кристаллизации. Таким образом, структурное совершенство макрокристаллов, при соответствующем градиенте температуры и скорости кристаллизации, определяется концентрацией легирующих элементов.

Установлено, что при наличии вогнутого фронта кристаллизации образуются границы срастания субзёрен с углами разориентации до 10° [4].

При огибании фронтом кристаллизации имеющихся в расплаве включений и оксидных плёнок в монокристаллах также образуются границы срастания субзёрен. В этом случае углы разориентации могут достигать 5° [4], что также существенно повышает требования к чистоте расплава НВ-4 для получения структурно совершенных монокристаллов-затравок.

Основной материал исследований

Провели исследование качества сплава 4 темплетов из сплава НВ-4 применяемого в качестве материала стартовых затравок при монокристаллическом литье:

– темплеты № 1 и № 2 – от двух слитков сплава

НВ-4 собственного производства;

– темплет № 3 – фрагмент литниково-питающей системы блока по изготовлению затравок;

– темплет № 4 – фрагмент от штанги сплава НВ-4 завода-поставщика.

При изготовлении слитков вакуумно-индукционным переплавом частей штанги завода-поставщика и собственного возврата (литниково-питающей системы) в металл дополнительно вводили присадку углерода в количестве до 0,1 %.

При исследовании проверялись:

– химический состав;

– макроструктура;

– микроструктура.

Внешний вид исследованных темплетов представлен на рис. 1

Согласно данным спектрального анализа исследованные темплеты из сплава НВ-4, по химическому составу удовлетворяют требованиям ТУ1-92-112-87 (табл. 1).



Рис. 1. Внешний вид исследованных темплетов

Таблица 1

Химический состав материала исследованных темплетов из сплава НВ-4

Темплет	Содержание элементов, % по массе		
	W	Fe	Si
№ 1	34,76	0,1	0,23
№ 2	34,97	0,1	0,27
№ 3	34,20	0,1	0,12
№ 4	34,12	0,09	0,11
ТУ1-92-112-87	32...36	< 1,0	< 0,4

Примечание. Допускается присутствие в сплаве примесей, % по массе: S < 0,015; P < 0,015.

Кроме того в материале темплетов №№ 1 и 2 определили содержание углерода (табл. 2).

Таблица 2

Содержание углерода в материале темплетов опытных плавов НВ-4

Темплет	Зона определения	Содержание С, % по массе
№ 1	верх	0,10
	середина	0,06
№ 2	верх	0,07
	середина	0,08

Макроструктуру изучали на темплетах после травления в реактиве, состоящем из 80 % HCl и 20 % H₂O₂.

Внешний вид макротемплетов после травления представлен на рис. 2.

Макроструктура состоит из следующих кристаллизационных зон:

- зоны столбчатых кристаллов;
- зона равноосных кристаллов;
- усадочная раковина.

В структуре заготовки неметаллических включений и литейных плен не обнаружено.

Результаты замера параметров макроструктуры приведены в таблице 3.

Микроструктура исследовалась на нетравленных микрошлифах темплетов и после травления их, под световым микроскопом при увеличениях $\times 100$ и $\times 500$.

Микроанализом по полю шлифов выявлены рассеянные неметаллические включения серого оттенка до $\sim \varnothing 0,03$ мм, особенно густо расположенные на темплете №3 (рис. 3).

Плен и грубых шлаковых включений по сечению не обнаружено.

Исследованиями на растровом электронном микроскопе с помощью рентгеноспектрального анализатора определен поэлементный состав и установлен оксидный тип неметаллических включений, выявленных в материале темплета исследованной отливки затравочных пластин из сплава НВ-4 (рис. 4).

Микроструктура материала исследованных темплетов после травления, соответствует литому состоянию сплава НВ-4 и представляет собой крупные зерна (Ni-W)-твердого раствора и карбиды γ -твердый раствор (рис. 5).

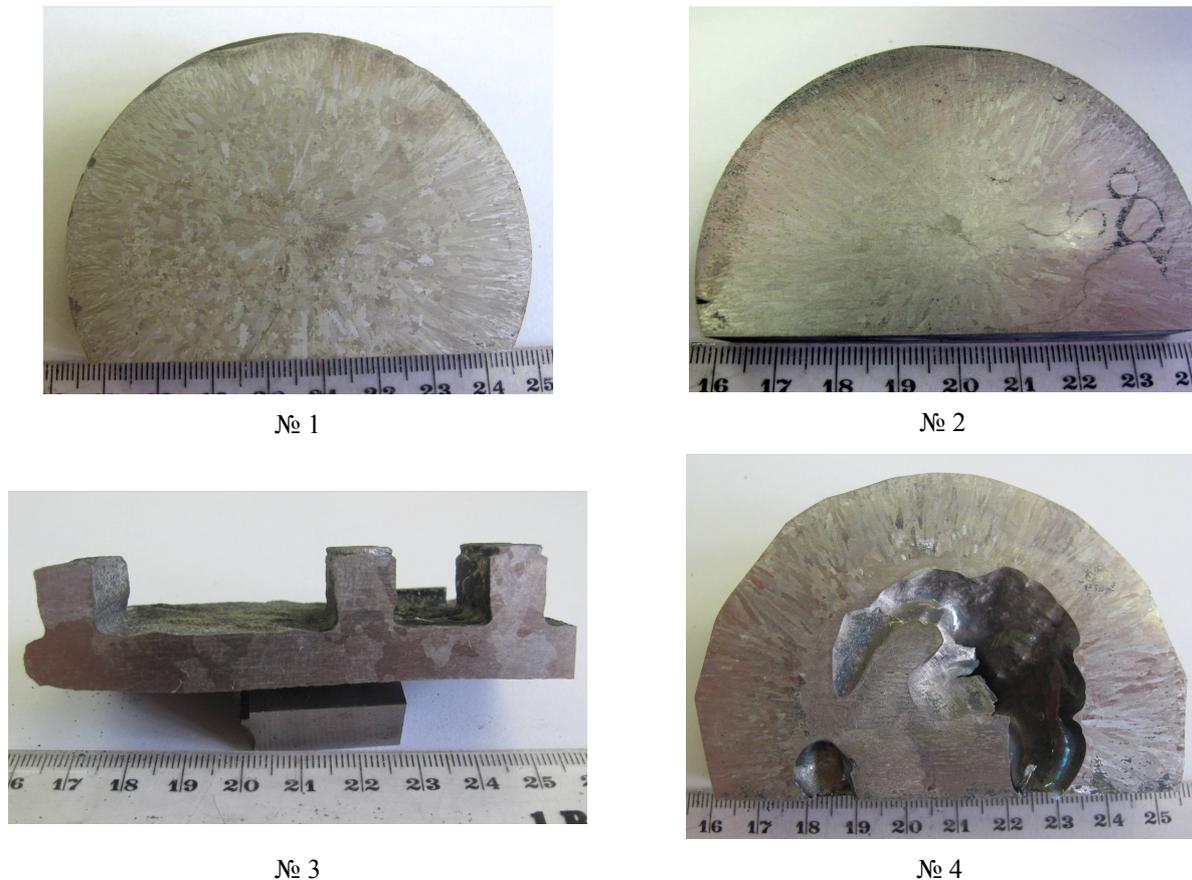
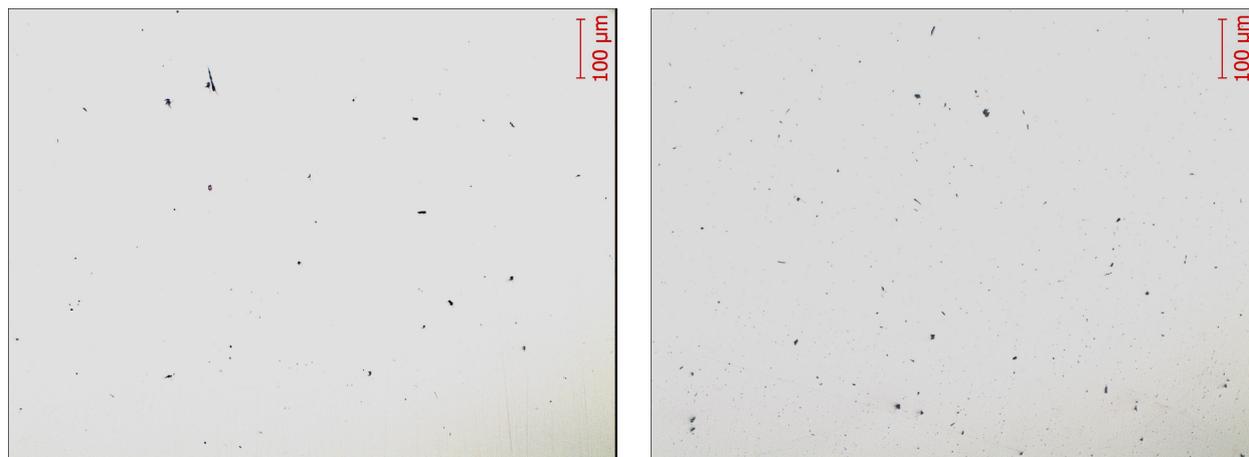
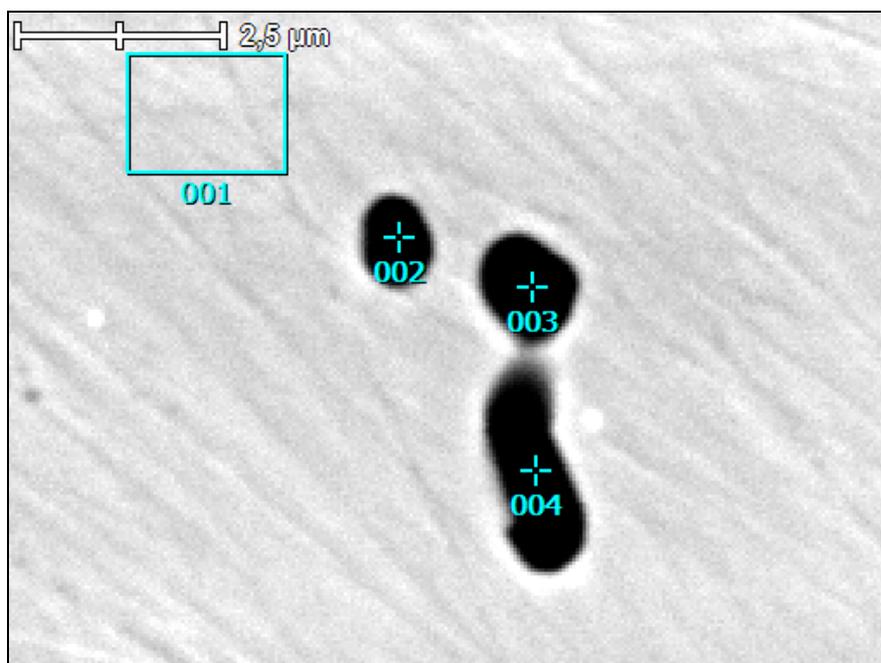


Рис. 2. Макроструктура исследованных темплетов

Таблица 3

Параметры макроструктуры темплетов из сплава НВ-4

Темплет	Размер кристаллизационных зон, мм			Размер усадочной раковины в центре, мм	Размер макрозерна, мм
	Зона мелких подкорковых кристаллов	Зона столбчатых кристаллов	Зона равноосных кристаллов		
№ 1	1...3	$\sim 20...24$	$\varnothing \sim 36$	-	2...4
№ 2	1...3	$\sim 15...20$	$\varnothing \sim 50$	-	3...5
№ 3	-	-	по всему сечению макрошлифа	-	3...10
№ 4	1...2	$\sim 16...18$	$\varnothing \sim 45$	$\sim 30 \times 60$	3...9

Рис. 3. Неметаллические включения в материале исследованных темплетов из сплава НВ-4, $\times 100$ 

№ точки	Содержание элементов, % по массе			
	O	Al	Ni	W
001			74,10	25,90
002	16,48	39,05	29,25	15,22
003	21,77	49,00	18,07	11,15
004	20,44	50,06	21,32	8,18

Рис. 4. Поэлементный состав неметаллических включений в материале темплета исследованной отливки затравочных пластин из сплава НВ-4, $\times 12000$

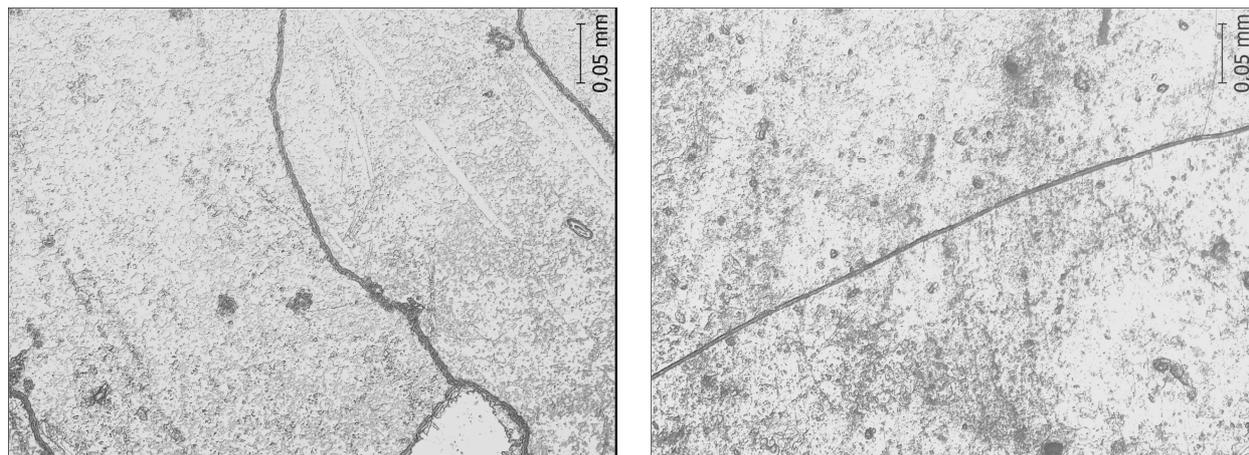


Рис. 5. Микроструктура исследованных темплетов из сплава НВ-4, $\times 200$

Выводы

По химическому составу материал НВ-4 исследованных темплетов отвечает требованиям ТУ1-92-112-92. Кроме того в материале опытных темплетов №№ 1 и 2 установлено содержание углерода до 0,1 %.

Макроструктура исследуемых темплетов соответствует ТУ1-92-112-92. Плен и грубых шлаковых включений на макрошлифах не обнаружено.

Микроструктура исследованных темплетов характерна для литого состояния сплава НВ-4. По полю шлифов выявлены неметаллические включения $\sim \varnothing$ до 0,03мм.

Для формирования структурно совершенных литых затравок используемых при изготовлении монокристаллических лопаток необходимо обеспечить повышенную чистоту сплава НВ-4 по наличию примесей, неметаллических включений, оксидных плёнок.

Для обеспечения формирования совершенной структуры монокристаллических отливок может быть рекомендовано использование затравок из сплава НВ-4 с дополнительным содержанием углерода до 0,1 %, который препятствует его поверхностному окислению, обеспечивает хороший контакт расплав – затравка, нормальное смачивание поверхности и частичное растворение торца затравки.

Литература

1. Барабаш, О. М. *Металлофизические новейшие технологии [Текст]* / О. М. Барабаш, В. З. Войнаш. – 2000. – Т. 22, № 2. – С. 94.
2. Толораия, В. Н. *Усовершенствованный метод монокристаллического литья турбинных лопаток ГТД и ГТУ [Текст]* / В. Н. Толораия, Н. Г. Орехов, Е. Н. Каблов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2002. – № 2. – С. 12-16.

3. *Влияние условий кристаллизации на макроскопический фронт кристаллизации и структурное совершенство монокристаллов Ni-сплавов [Текст]* / В. М. Ажажа, В. Я. Свердлов, А. А. Кондратов и др. // *Вестник ХНУ.* – 2007. – Вып. 781. – С. 73–80.

4. *Современная кристаллография. В 4-х томах. Образование кристаллов [Текст]* / А. А. Чернов, Е. И. Гиваргизов, Х. С. Богдасаров и др. – М.: Наука, 1980. – Т. 3. – 408 с.

References

1. Barabash, O. M., Voinash, V. Z. *Metallofizicheskie novejschie tehnologii* [Metallophysical latest technologies]. 2000, vol. 22, no. 2, pp. 94.
2. Toloraya, V. N., Orekhov, N. G., Kablov, E. N. *Usovershenstvovannyj metod monokristallicheskogo lit'ja turbinnyh lopatok GTD i GTU* [An improved method for single-crystal casting turbine blades GTE and GTU]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*, 2002, no. 2, pp. 12-16.
3. Azhazha, V. M., Sverdlov, V. Ya., Kondratov, A. A. *Vlijanie uslovij kristallizacii na makroskopicheskij front kristallizacii i strukturnoe sovershenstvo monokristallov Ni-splavov* [Influence of crystallization conditions on the macroscopic crystallization front and structural perfection of Ni-alloys single crystals]. *Vestnik HNU*, 2007, vol. 781, pp. 73-80.
4. Chernov, A. A., Givargizov, E. I., Bogdasarov, H. S. *Sovremennaja kristallografija. V 4-h tomah. Obrazovanie kristallov* [Modern crystallography. In 4 volumes. Formation of crystals]. Moscow, Nauka Publ., 1980, vol. 3. 408 p.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Машины и технология литейного производства» Э. И. Цивирко, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗАТРАВOK ДЛЯ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО ЛИТВА

В. В. Клочихін, Н. О. Лисенко, Є. В. Мілонін, Я. А. Берестовий, В. В. Наумик

Відомо, що чистота затравочного сплаву НВ-4 за хімічним складом і неметалевими включеннями багато в чому визначає якість виготовлених монокристалічних лопаток для авіаційних двигунів, а додаткове введення в нього вуглецю запобігає поверхневого окисленню затравок і сприяє формуванню досконалої структури виливків. Вивчено якість матеріалу, що застосовуються в якості затравок зі сплаву НВ-4 з додатковим вмістом вуглецю в кількості до 0,1%. Виявлено перспективні напрямки удосконалення технології отримання відповідальних деталей авіаційного машинобудування.

Ключові слова: затравочний сплав НВ-4, хімічний склад, макроструктура, мікроструктура.

INVESTIGATION OF THE QUALITY OF SEED MATERIAL FOR MONOCRYSTALLIC CASTS

V. V. Klochikhin, N. A. Lysenko, E. V. Milonin, Y. A. Berestovoy, V. V. Naumik

It is known that the purity of the seed alloy NB-4 in terms of chemical composition and nonmetallic inclusions much determines the quality of single-crystal blades for aircraft engines, and the additional introduction of carbon in it prevents surface oxidation of seeds and contributes to the formation of a perfect cast structure. The quality of the seed materials from the alloy NB-4 with an additional carbon content of up to 0.1% was studied. Promising directions for improving the technology of obtaining critical parts of aircraft engineering were identified.

Keywords: seed alloy NB-4, chemical composition, macrostructure, microstructure.

Клочихин Владимир Валерьевич – начальник управления главного металлурга АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Лысенко Наталия Алексеевна – ведущий инженер управления главного металлурга АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Милонин Евгений Владимирович – начальник цеха АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: milon7n@gmail.com.

Берестовой Ярослав Андреевич – инженер технолог АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: cicerone.euoperim@gmail.com.

Наумик Валерий Владиленович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. машин и технологии литейного производства, проректор Запорожского национального технического университета (ЗНТУ) по научной работе, Запорожье, Украина, e-mail: naumik@zntu.edu.ua.

Klochikhin Vladimir Valerievich – chief of metallurgical engineers department JSC «Motor Sich», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Lysenko Nataliia Alexeyevna – project engineer in chief of metallurgical engineers department JSC «Motor Sich», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Milonin Evgeniy Vladimirovich – Head of the shop JSC «Motor Sich», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: milon7n@gmail.com.

Berestovoy Yaroslav Andreevich – engineer technologist JSC «Motor Sich», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: cicerone.euoperim@gmail.com.

Naumyk Valeriy Vladilenovich – doctor of technical sciences, professor, Professor of the Department of foundry machinery and technology, Vice-rector of Zaporizhzhya National Technical University (ZNTU) for scientific work, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: naumik@zntu.edu.ua.