

**В. В. Ключихин**, инженер, нач. упр. гл. металлурга

**П. Д. Жеманюк**, канд. техн. наук, техн. директор

**Н. И. Гречанюк\***, дир. по науке и производству

**В. В. Наумик\*\***, д-р техн. наук, проф., проректор по науч. работе и межд. деятельности, e-mail: naumik@zntu.edu.ua

АО «Мотор Сич», Запорожье

\*ООО «Научно-производственное предприятие «ЭЛТЕХМАШ», Винница

\*\*Запорожский национальный технический университет, Запорожье

## Исследование качества материала слитков, полученных методом электронно-лучевого переплава из 100 % отходов сплава НВ-4

*Исследованные заготовки сплава НВ-4, полученные методом электронно-лучевого переплава из 100 % отходов, по химическому составу, макро- и микроструктуре соответствуют требованиям ТУ. В материале имеется незначительное количество шаровидных оксидных включений размером, в основном, до 8 мкм. Микропористость в заготовках незначительна. Микроструктура представляет собой  $\gamma$ -твердый раствор. Из опытных слитков методом высокоскоростной направленной кристаллизации изготовлены затравки для монокристаллического литья. Практически треть полученных затравок имела угол КГО до 5°. Выход годного литья по макроструктуре с использованием опытных затравок превысил 90 %.*

**Ключевые слова:** затравочный сплав, возвратные отходы, электронно-лучевой переплав, химический состав, макроструктура, микроструктура, угол кристаллографической ориентации (КГО), направленная кристаллизация, затравка.

**А**нализ состояния вопроса. При производстве литых лопаток газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов с направленной и монокристаллической макроструктурой используют монокристаллические затравки из сплава НВ-4, от структурного совершенства которых во многом зависит качество получаемых отливок [1–3].

На сегодня затравки изготавливают методом высокоскоростной направленной кристаллизации на установках типа УВНК-9А. Но обеспечить достаточное структурное совершенство и достаточный выход годного при производстве монокристаллических затравок пока не удается [4, 5].

Было установлено [6], что для формирования структурно совершенных литых затравок, используемых при изготовлении монокристаллических лопаток, необходимо обеспечить повышенную чистоту сплава НВ-4 по наличию примесей, неметаллических включений, оксидных плен. Для достижения этого при литье монокристаллических затравок из сплава НВ-4 было предложено применение электронно-лучевого переплава на этапе получения затравочного сплава.

Ранее было проведено исследование заготовок первичного сплава НВ-4, полученных методом электронно-лучевого переплава материалов, и установлено их соответствие требованиям ТУ1-92-112-87 по химическому составу, макро- и микроструктуре.

Однако по мере увеличения количества скопившихся отходов дорогостоящих материалов, применяемых в авиационном машиностроении, все более остро встает проблема их повторного использования. В данной работе рассматривается возможность при-

менения современной технологии специальной металлургии для использования отходов сплава НВ-4 при получении качественных литых лопаток с монокристаллической макроструктурой.

**Основной материал исследований.** Проводили исследование материала слитков из сплава НВ-4, полученного методом электронно-лучевого переплава (ЭЛП) из 100 % отходов сплава.

Были исследованы темплеты, вырезанные из верхней, средней и нижней частей слитков.

Электронно-лучевой переплав отходов сплава НВ-4 был выполнен на НПП «Элтехмаш» г. Винница.

Для сравнения исследовали темплет из серийно применяемого сплава НВ-4.

При исследовании проверялись:

- химический состав;
- макроструктура;
- микроструктура.

Согласно данным спектрального анализа, темплеты слитков как после электронно-лучевого переплава 100 % отходов, так и серийно применяемого сплава НВ-4, соответствуют требованиям нормативно-технической документации (таблица).

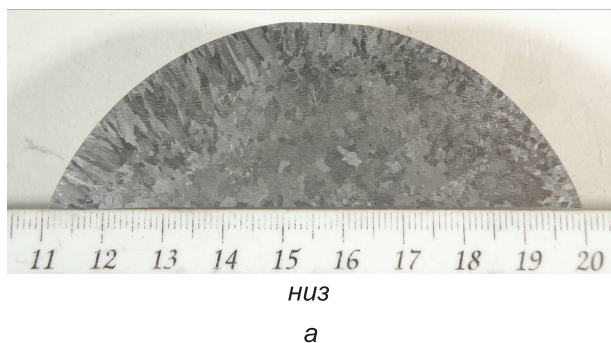
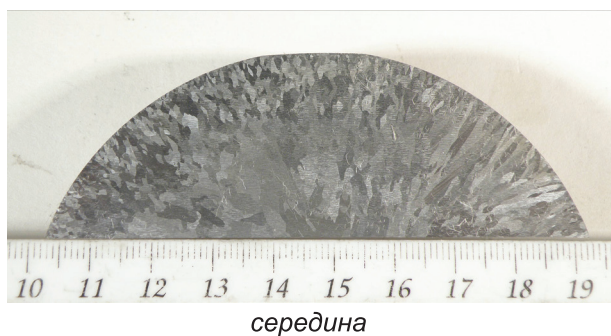
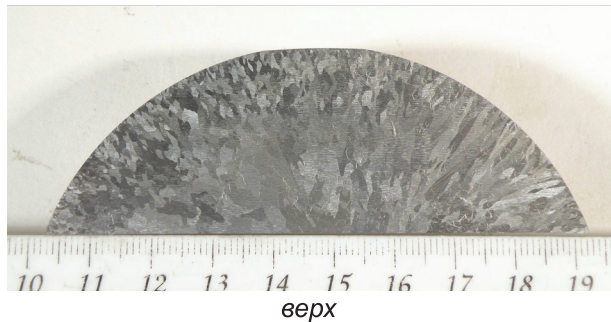
Макроструктуру изучали на темплатах после травления в реактиве, состоящем из 80 % HCl и 20 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. При визуальном осмотре макрошлифов дефекты не обнаружены (рис. 1).

В структуре исследуемых фрагментов заготовок наблюдаются следующие кристаллизационные зоны:

- зона мелких подкорковых кристаллов;
- зона столбчатых кристаллов;
- зона равноосных кристаллов.

## Химический состав исследованных темплетов слитков сплава НВ-4

| Материал темплета и часть отливки |          | Содержание элементов, %мас. |       |       |       |        |        |
|-----------------------------------|----------|-----------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|
|                                   |          | Ni                          | W     | Fe    | Si    | S      | P      |
| ЭЛП 100 % отходов                 | верх     | основа                      | 34,7  | 0,15  | 0,10  | <0,001 | 0,002  |
|                                   | середина | основа                      | 34,0  | 0,10  | 0,08  | <0,001 | 0,002  |
|                                   | низ      | основа                      | 34,5  | 0,10  | 0,10  | <0,001 | 0,002  |
| Серийный сплав                    |          | основа                      | 35,00 | <0,13 | <0,11 | <0,002 | <0,003 |
| ТУ1-92-112-87                     |          | основа                      | 32-36 | <1,0  | <0,4  | <0,015 | <0,015 |



**Рис. 1.** Макроструктура исследованных темплетов слитков сплава НВ-4: а – электронно-лучевой переплав 100 % отходов; б – серийный сплав

При исследовании микрошлифов, изготовленных из центральной и краевой зон темплетов слитков после электронно-лучевого переплава 100 % отходов сплава НВ-4, выявлено незначительное количество рассеянных неметаллических включений серого цвета, расположенных ближе к центру отливки, в основном размером до 0,01 мм, отдельные – до ~0,35 мм (рис. 2, 3).

Размер и распределение неметаллических включений в материале слитка серийно применяемого сплава НВ-4 аналогичны (рис. 4).

При металлографическом исследовании установлено, что микроструктура исследуемых темплетов аналогична, представляет собой  $\gamma$ -твердый раствор (рис. 5).

Таким образом, отливки затравочных пластин, изготовленные методом высокоскоростной направленной кристаллизации из материала опытных слитков сплава НВ-4, полученных электронно-лучевым пере-

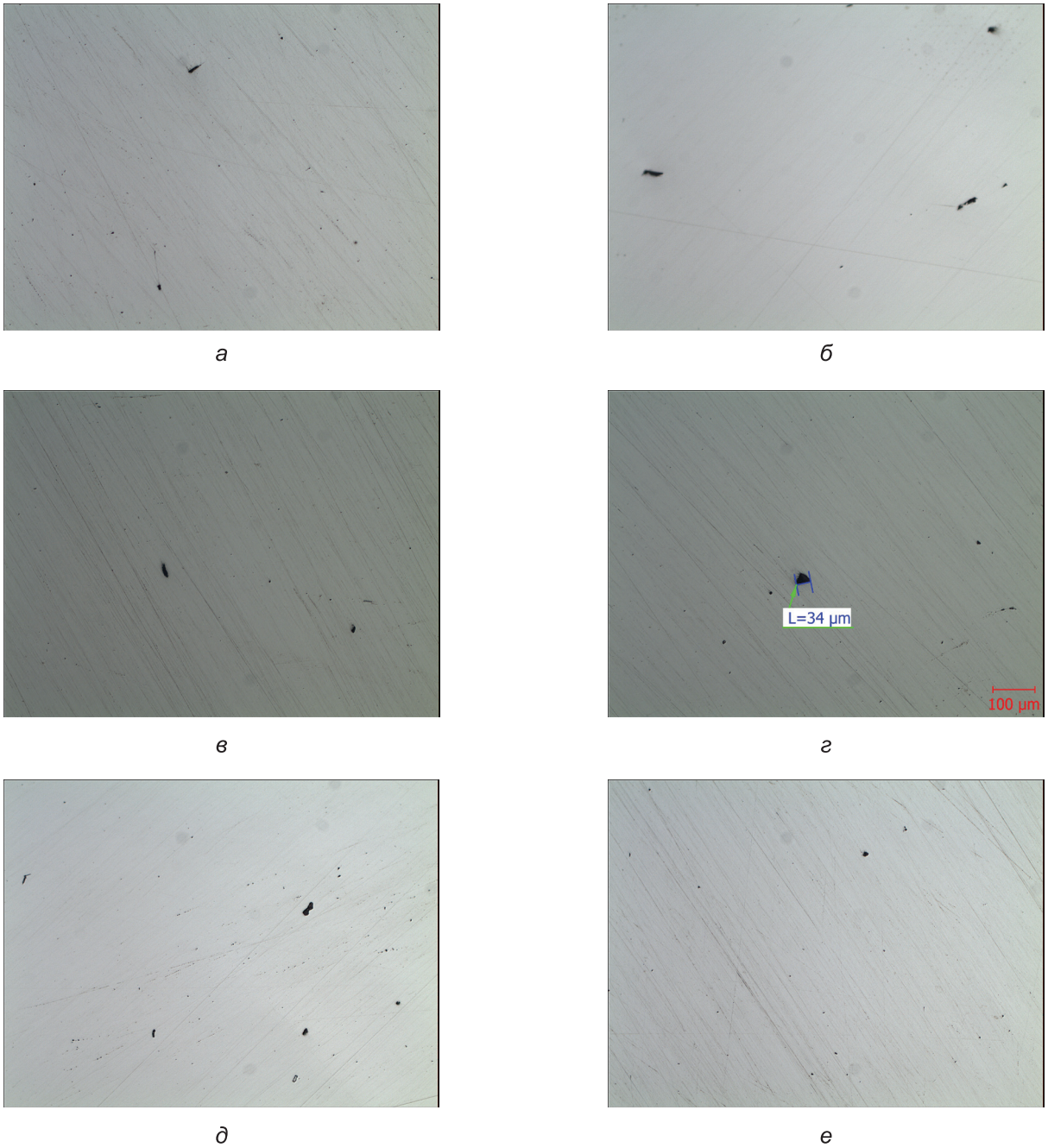
плавом, в том числе и из 100 % отходов, могут быть рекомендованы для изготовления затравок, применяемых при литье монокристаллических изделий для авиационного машиностроения.

С использованием опытных слитков сплава НВ-4, полученных из 100 % возврата методом электронно-лучевого переплава, по серийно применяемой технологии были изготовлены затравки для монокристаллического литья.

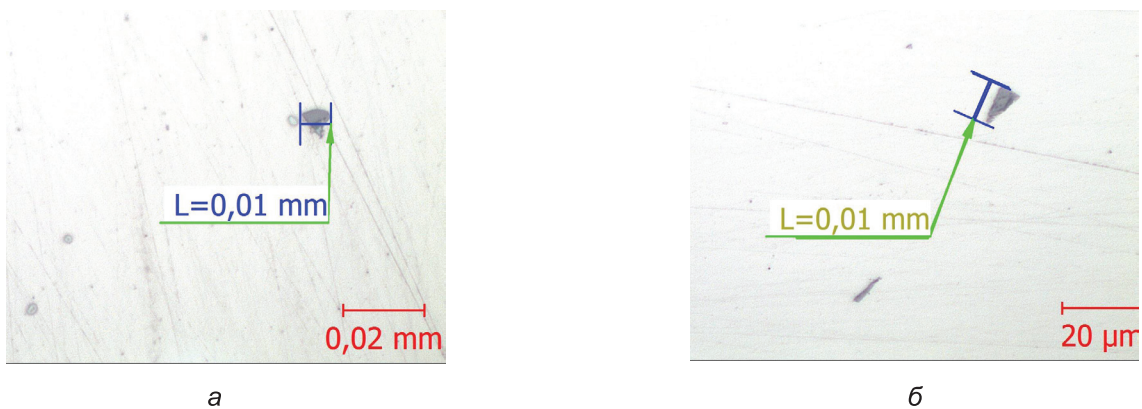
Рентгеноструктурным контролем на анализаторе ДРОН-6 установлено, что 30,98 % изготовленных затравок имели угол отклонения кристаллографического направления [001] от вертикальной оси Z не более чем на 5°.

С использованием опытных затравок методом высокоскоростной направленной кристаллизации были отлиты 204 монокристаллические лопатки. Выход годного литья по макроструктуре составил 93,6 %.

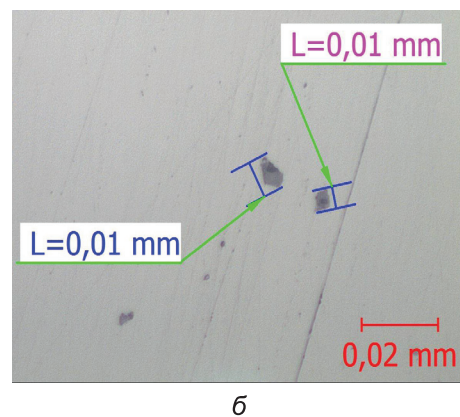
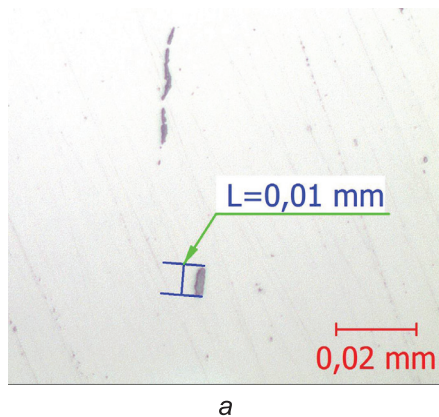




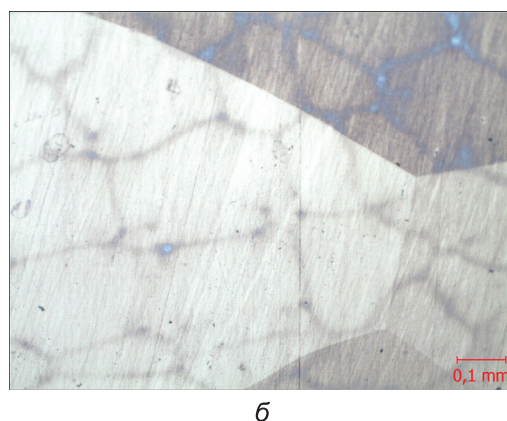
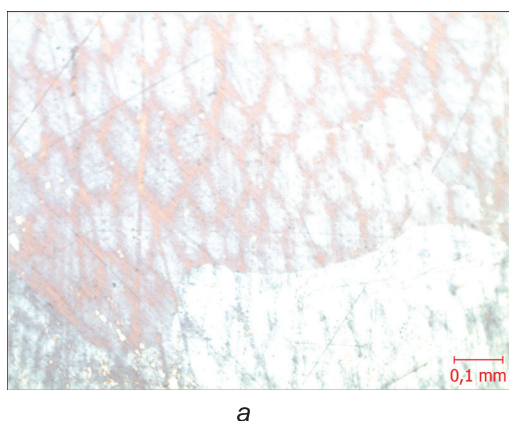
**Рис. 2.** Неметаллические включения в различных зонах исследованных фрагментов слитка из сплава НВ-4, отлитого методом электронно-лучевого переплава 100 % отходов сплава,  $\times 100$ : а – край, верхняя часть; б – центр, верхняя часть; в – край, средняя часть; г – центр, средняя часть; д – край, нижняя часть; е – центр, нижняя часть



**Рис. 3.** Неметаллические включения в материале слитка из сплава НВ-4, отлитого методом электронно-лучевого переплава 100 % отходов сплава,  $\times 500$ : а – краевая зона; б – центральная зона



**Рис. 4.** Неметаллические включения в материале слитка серийно применяемого сплава НВ-4,  $\times 500$ : а – краевая зона; б – центральная зона



**Рис. 5.** Микроструктура исследованных темплетов сплава НВ-4,  $\times 500$ : а – электронно-лучевой переплав 100 % отходов; б – серийный сплав

## Выводы

Материал слитков из сплава НВ-4, полученного методом электронно-лучевого переплава из 100 % отходов сплава на НПП «Элтехмаш» г. Винница, по химическому составу соответствует требованиям ТУ1-92-112-87.

В материале всех исследованных темплетов из сплава НВ-4 выявлено незначительное количество рассеянных неметаллических включений серого цвета, расположенных ближе к центру отливки, в основном размером до 0,01 мм, отдельные – до ~0,35 мм.

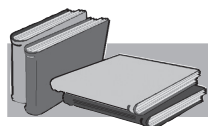
Микроструктура исследованных темплетов после электронно-лучевого переплава 100 % отходов и серийно применяемого сплава НВ-4 аналогична,

представляет собой  $\gamma$ -твердый раствор. Дефекты не обнаружены.

Из опытных слитков сплава НВ-4, полученных из 100 % возврата методом электронно-лучевого переплава, методом высокоскоростной направленной кристаллизации были изготовлены затравки для монокристаллического литья.

Рентгеноструктурным контролем на анализаторе ДРОН-6 установлено, что более трети полученных затравок имеют угол КГО до  $5^\circ$ .

С использованием опытных затравок методом высокоскоростной направленной кристаллизации были отлиты 204 монокристаллические лопатки. Выход годного литья по макроструктуре составил свыше 90 %.

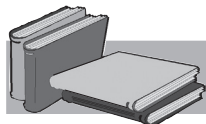


## ЛИТЕРАТУРА

1. Ажажа В. М., Горбенко Ю. В., Ковтун Г. П. и др. Рост монокристаллов сплава Ni-W в условиях высокого градиента температуры // Кристаллография. – 2004. – том 49. – № 2. – С. 382–386.
2. Барабаш О. М., Войнаш В. З. Стабильность плоского фронта кристаллизации сплавов системы Ni – W. I. В окрестности точки конгруэнтного плавления Ni–15% ат. W // Металлофизика и новейшие технологии. – 2000. – Т. 22. – № 2. – С. 94–98.
3. Барабаш О. М., Войнаш В. З. Стабильность плоского фронта кристаллизации сплавов системы Ni–W. II. Область восходящего ликвидуса // Металлофизика и новейшие технологии. – 2000. – Т. 22. – № 3. – С. 100–102.
4. Ажажа В. М., Свердлов В. Я., Кондратов А. А. и др. Влияние условий кристаллизации на макроскопический фронт кристаллизации и структурное совершенство монокристаллов Ni-сплавов // Вестник ХНУ. – 2007. – № 781. – Вып. 3(35). – С. 73–80.



5. Чернов А. А., Гиваргизов Е. И., Богдасаров Х. С. и др. Современная кристаллография. В 4-х томах. Образование кристаллов. – М.: «Наука». – 1980. – Т. 3. – 408 с.
6. Клочихин В. В., Лысенко Н. А., Наумик В. В. Пути повышения выхода годного при изготовлении затравок из сплава НВ-4 для монокристаллического литья // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра [Електрон. ресурс]: матеріали XV Всеукраїнської науково-практичної конференції, Київ, 11 квітня 2017 р. / [редкол.: К. В. Михаленков (відпов. ред.) та ін.]. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 568–575. URL: <http://www.fhotm.kpi.ua/labours/labours-2017.pdf>



## REFERENCES

1. Azhazha V. M., Gorbenko Yu. V., Kovtun G. P. et al. (2004). Rost monokristallov splava Ni-W v usloviakh vysokogo gradienta temperatury [Growth of single crystals of Ni-W alloy under conditions of high temperature gradient]. Kristallografiia, vol. 49, no. 2, pp. 382–386 [in Russian].
2. Barabash O. M., Voinash V. Z. (2000). Stabil'nost' ploskogo fronta kristallizatsii splavov sistemy Ni – W. I. V okrestnosti tochki kongruentnogo plavleniia Ni–15% at. W [Stability of the flat crystallization front for Ni-W. I alloys. In the vicinity of the point of congruent melting, Ni–15% at. W]. Metallofizika i noveishie tekhnologii, vol. 22, no. 2, pp. 94–98 [in Russian].
3. Barabash O. M., Voinash V. Z. (2000). Stabil'nost' ploskogo fronta kristallizatsii splavov sistemy Ni–W. II. Oblast' voskhodiashchego likvidusa [Stability of the flat front of crystallization of Ni-W system alloys. II. The region of the ascending liquidus]. Metallofizika i noveishie tekhnologii, vol. 22, no. 3, pp. 100–102 [in Russian].
4. Azhazha V. M., Sverdlov V. Ya., Kondratov A. A. et al. (2007). Vliianie uslovii kristallizatsii na makroskopicheskie front kristallizatsii i strukturnoe sovershenstvo monokristallov Ni-splavov [Influence of crystallization conditions on macroscopic crystallization front and structural perfection of Ni-alloys single crystals]. Vestnik KhNU, no. 781, iss. 3 (35), pp. 73–80 [in Russian].
5. Chernov A. A., Givargizov E. I., Bogdasarov Kh. S. et al. (1980). Sovremennaiia kristallografiia. V 4-kh tomakh. Obrazovanie kristallov [Modern crystallography. In 4 volumes. Formation of crystals]. Moscow: Nauka, vol. 3, 408 p. [in Russian].
6. Klochikhin V. V., Lysenko N. A., Naumik V. V. (2017). Puti povysheniia vykhoda godnogo pri izgotovlenii zatravok iz splava NV-4 dlia monokristallicheseskogo lit'ia [Ways to increase the yield of suitable NV-4 alloy seeds for single-crystal casting]. Special metallurgy: yesterday, today, tomorrow [Electron. resource]: materials of XV All-Ukrainian scientific and practical conference, Kyiv, 11 April 2017 [editorial board: K. V. Mikhalenkov (executive editor) et al.]. Kiev: KPI im. Igoria Sikors'kogo, pp. 568–575. URL: <http://www.fhotm.kpi.ua/labours/labours-2017.pdf> [in Russian].

### Анотація

*Клочихін В. В., Жеманюк П. Д., Гречанюк М. І., Наумик В. В.*

Дослідження якості матеріалу зливків, отриманих методом електронно-променевого переплаву з 100 % відходів сплаву НВ-4

Досліджені заготовки сплаву НВ-4, отримані методом електронно-променевого переплаву з 100 % відходів, за хімічним складом, макро- і мікроструктурою відповідають вимогам ТУ. У матеріалі є незначна кількість кулястих оксидних вкраплень розміром, в основному, до 8 мкм. Мікропористість у заготовках незначна. Мікроструктурою досліджуваних заготовок є  $\gamma$ -твердий розчин. З дослідних зливків методом високошвидкісної спрямованої кристалізації виготовлено затравки для монокристалічного литва. Практично третина отриманих затравок мала кут КГО до 5°. Вихід придатного литва за макроструктурою з використанням дослідних затравок перевищив 90 %.

### Ключові слова

*Затравочний сплав, зворотні відходи, електронно-променевий переплав, хімічний склад, макроструктура, мікроструктура, кут кристаліграфічної орієнтації (КГО), спрямована кристалізація, затравка.*

### Summary

*Klochikhin V., Zhemaniuk P., Grechaniuk N., Naumyk V.*

Investigation of ingots material quality obtained by the electron-beam remelting method from 100 % waste of NV-4 alloy

The investigated billets of alloy NV-4, obtained by electron-beam remelting method from 100 % waste by chemical composition, macro- and microstructure correspond to the requirements of technical specifications. In the material, there is an insignificant amount of spherical oxide inclusions in size, mainly up to 8 micrometers. Microporosity in billets is negligible. The microstructure of the test billets is a  $\gamma$ -solid solution. Using the experimental ingots by the method of high-speed directional crystallization, seeds for single-crystal casting were made. Practically one third of the seeds obtained had an angle of CGO of 5°. The yield of a suitable casting on the macrostructure using the experimental seeds exceeded 90 %.

**Сердечно поздравляем с Юбилеем**

**ЧАПЛЫГИНУ**

**Людмилу Степановну!**



*Благодарим Вас за многолетний, плодотворный труд в институте и значительный вклад в развитие стандартизации, участие в разработке технологических процессов, нормативных документов и государственных стандартов Украины. Желаем Вам крепкого здоровья, счастья и творческого вдохновения!*

***Коллектив Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины***