

Научная статья

УДК 621.318.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-77-89

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ИЗ СПЛАВА ЮНДКБА

И.В. Чередниченко<sup>1</sup>, М.А. Бавина<sup>2</sup>, Ю.А. Бондаренко<sup>1</sup>, В.Д. Шурыгин<sup>1</sup>,  
А.Д. Овчинников<sup>2</sup>, С.А. Галимуллин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия; mai@mai.ru

**Аннотация.** Исследовано влияние параметров направленной кристаллизации на выход годного по магнитным характеристикам постоянных магнитов из сплава ЮНДКБА (Alnico 5-7). Изготовлены постоянные магниты с использованием различного вида затравок и при разных технологических режимах. Установлено, что важными параметрами при получении отливок постоянных магнитов являются: температура, скорость кристаллизации, химический состав и тип используемых затравок. Выявлено, что низкая скорость протяжки и использование монокристаллической затравки из сплава системы «железо–хром» с кристаллографической ориентацией  $\langle 001 \rangle$  позволяют получать постоянные магниты с выходом годного более 80 %.

**Ключевые слова:** литые постоянные магниты из сплава ЮНДКБА (Alnico 5-7), магниты со столбчатой кристаллической текстурой, магниты с монокристаллической структурой, направленная кристаллизация, магнитные свойства, литье с высоким температурным градиентом

**Для цитирования:** Чередниченко И.В., Бавина М.А., Бондаренко Ю.А., Шурыгин В.Д., Овчинников А.Д., Галимуллин С.А. Влияние параметров направленной кристаллизации на структуру и свойства постоянных магнитов из сплава ЮНДКБА // Труды ВИАМ. 2023. № 11 (129). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-77-89.

Scientific article

## INFLUENCE OF DIRECTED CRYSTALLIZATION PARAMETERS ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALNICO 5-7 ALLOY PERMANENT MAGNETS

I.V. Cherednichenko<sup>1</sup>, M.A. Bavina<sup>2</sup>, Yu.A. Bondarenko<sup>1</sup>, V.D. Shurygin<sup>1</sup>,  
A.D. Ovchinnikov<sup>2</sup>, S.A. Galimullin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow Aviation Institute (National Research University)», Moscow, Russia; mai@mai.ru

**Abstract.** In this paper has been investigated influence of direct crystallizations parameters on permanent magnets alloy UNDKBA (Alnico 5-7) for non-defective percent. For this paper were produced permanent magnets by using different types of seeds and technological parameter. It established that the main parameters for manufacturing castings permanent magnets are temperature, broaching speed, composition and type of the seed. Revealed that slow broaching

*speed, monocrystalline seed with the crystallographic orientation  $\langle 100 \rangle$  allows to obtain permanent magnets with non-defective percent higher than 80.*

**Keyword:** *cast permanent magnets Alnico 5-7, column grain structure magnets, monocrystalline magnets, directional solidification, magnetic properties, high temperature gradient casting*

**For citation:** Cherednichenko I.V., Bavina M.A., Bondarenko Yu.A., Shurygin V.D., Ovchinnikov A.D., Galimullin S.A. Influence of directed crystallization parameters on structure and properties of Alnico 5-7 alloy permanent magnets. *Trudy VIAM*, 2023, no. 11 (129), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-77-89.

## Введение

В области электро- и радиотехники, приборостроения активно развиваются новые технологии, в которых используются высокоэнергетические постоянные магниты. Литые постоянные магниты из сплавов системы Fe–Al–Ni–Co (сплавов типа ЮНДК) с кристаллической и магнитной текстурами обладают высоким уровнем магнитных свойств. Постоянные магниты из сплава типа ЮНДК используют в устройствах, в которых рабочая температура достигает 550 °С: в качестве деталей электротехнических изделий и сверхвысокочастотной техники, в приборах навигационной техники. Сплавы типа ЮНДК уступают высокоэнергетическим порошковым магнитам по максимально-му энергетическому произведению и коэрцитивной силе, однако обладают высокой рабочей температурой, поэтому их нельзя заменить при производстве ответственных устройств и приборов [1, 2].

Сплавы типа ЮНДК являются дисперсионно-твердеющими, их магнитные свойства обусловлены уникальностью структуры, которая формируется при распаде высокотемпературного твердого раствора  $\alpha \rightarrow \alpha_1 + \alpha_2$  с выделением анизотропной формы  $\alpha_1$ -фазы (сильномагнитной фазы, обогащенной Fe и Co) и  $\alpha_2$ -фазы (немагнитной фазы, обогащенной Ni и Al). Расположение частиц  $\alpha_1$ -фазы ориентировано вдоль семейства направлений матрицы  $\langle 001 \rangle$ .

Изучение влияния термомагнитной обработки позволило увеличить уровень магнитных свойств сплавов типа ЮНДК. При термомагнитной обработке частицы сильномагнитной  $\alpha_1$ -фазы выделяются вдоль направления приложения магнитного поля, ближайшего к кристаллографическому направлению  $\langle 001 \rangle$ . Дальнейшее улучшение магнитных свойств сплавов возможно за счет более совершенной кристаллической структуры, которая формируется путем создания на фронте кристаллизации температурного градиента, приводящего к получению макроструктуры столбчатых кристаллов, оси которых совпадают с кристаллографическим направлением  $\langle 001 \rangle$ .

В расплавленном металле всегда присутствуют растворимые и нерастворимые примеси, которые могут существенно влиять на процесс кристаллизации, изменяя скорость образования центров кристаллизации при определенной степени переохлаждения. Таким образом, характер процесса зависит от того, достаточно ли степени переохлаждения для образования новых центров кристаллизации или же затвердевание будет происходить в результате роста уже имеющихся кристаллов. В ходе направленной кристаллизации столбчатые кристаллы растут в направлении теплового потока и ориентируются вдоль кристаллографического направления  $\langle 001 \rangle$ . Наличие в жидком металле частиц нерастворимых примесей, например сульфидов железа, способствует зарождению новых центров кристаллизации и сдвигу температуры зарождения новых кристаллов в область меньшего переохлаждения [1, 3], что облегчает формирование регламентированной структуры.

Столбчатую кристаллическую структуру в материале можно создать следующими способами: литье с применением направленной кристаллизации в специальной

установке при неподвижной литейной форме; литье в формы с сотовыми ячейками, установленными на специальный холодильник; литье в холодные песчаные формы с системой обогрева металла металлом; высокочастотный нагрев формы. Во всех перечисленных методах столбчатая структура образуется за счет того, что в литейной форме аккумулируется достаточное количество тепла от внешнего источника или от самого металла, а направленный теплоотвод по оси отливки проводится с использованием массивного водоохлаждаемого холодильника, на котором установлена литейная форма [3]. Однако описанные приемы кристаллизации имеют недостаток – неконтролируемо изменяющийся градиент температуры. После перемещения кристаллизатора из высокотемпературной зоны печи разность температур снижается, в результате в сплаве начинают расти равноосные «паразитные» зерна.

В авиационной промышленности для изготовления лопаток газотурбинных двигателей направленную кристаллизацию никелевых сплавов проводят с применением затравок и жидкометаллического охладителя (оловянного или алюминиевого) в специальных установках высокоградиентной направленной кристаллизации [4–7]. Данная технология позволяет получить температурный градиент вплоть до 150 °С/см. Такой способ позволяет контролировать температурный градиент по всей высоте отливки, что не достигается при литье с использованием водоохлаждаемого холодильника [8–13].

В настоящее время исследование постоянных магнитов из сплавов типа ЮНДК (в зарубежной терминологии – Alnico) продолжается. Теоретические предпосылки, изложенные в работе [14], показывают, что благодаря возможности совершенствования структуры, отвечающей за высококоэрцитивное состояние магнитов, есть резерв для улучшения эксплуатационных характеристик сплавов Alnico: коэрцитивную силу можно увеличить в 2 раза, максимальное энергетическое произведение – с 10,5 до ~21 МГс·Э. Таким образом, современные исследования литых магнитных материалов преимущественно направлены на совершенствование структуры высококоэрцитивного состояния магнитов [15, 16] за счет термообработки [17, 18] и легирования [19–22]. В работе [15] также упоминается о том, что магнитные свойства постоянных магнитов из сплавов типа ЮНДК тесно связаны с термомагнитной обработкой материала.

Продолжается изучение температурной стабильности магнитов из сплавов типа ЮНДК. В работе [23] исследовано влияние отжига на микроструктуру данных магнитов. Авторы показали, что продолжительность низкотемпературного старения влияет на структуру высококоэрцитивного состояния магнитного материала. Трехступенчатый отжиг приводит к перераспределению компонентов между  $\alpha_1$ - и  $\alpha_2$ -фазами, а также более дисперсному расположению частиц, что в свою очередь способствует повышению температурной стабильности сплава.

Большое распространение получили исследования спеченных и быстрозакаленных магнитов Alnico в виде смесей или добавок с редкоземельными магнитами из сплавов систем Nd–Fe–B и Sm–Co [24–32], однако до промышленных технологий они не доведены. Разработаны различные методы производства постоянных магнитов с помощью аддитивных технологий: селективное лазерное плавление (SLM), селективное лазерное спекание (SLS) и др. [33–35]. При использовании аддитивных технологий расход материалов снижается, появляется возможность создавать магниты с более высоким уровнем магнитных свойств по сравнению с порошковыми магнитами из сплавов типа ЮНДК. Благодаря постоянному развитию процессов аддитивного производства можно получать уникальную микроструктуру изделия, а также изменять ее [36–39]. Эксплуатационные характеристики магнитов, полученных с помощью аддитивных методов, приближаются к характеристикам магнитов промышленного производства, но технологии нуждаются в совершенствовании.

Приведенные исследования представляют научный интерес, однако существенные достижения в настоящее время не декларируются, что обуславливает актуальность совершенствования современных промышленных технологий.

Цель данной работы – изучить влияние параметров направленной кристаллизации на структуру и свойства постоянных магнитов из сплава ЮНДКБА, а также на выход годного по магнитным свойствам для определения возможности их промышленного изготовления с использованием установки высокоградиентной направленной кристаллизации типа УВНК-9А.

### Материалы и методы

Шихтовую заготовку сплава ЮНДКБА выплавляли в индукционной печи ВИАМ-2002 в газовой атмосфере аргона в основном тигле, позволяющем уменьшить газонасыщенность материала и содержание неметаллических включений, которые снижают технологичность сплава. Химический состав полученного сплава определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой, содержание серы и углерода – с использованием газоанализатора.

Литье заготовок проводили методом направленной кристаллизации в атмосфере аргона на установке высокоградиентной направленной кристаллизации УВНК-9А. Заливку проводили в керамическую форму, изготовленную из материала  $Al_2O_3$  (рис. 1). Керамическая форма для установки УВНК-9А имеет 9 отсеков с установленными в их основании затравками, обеспечивающими передачу кристаллографической ориентации отливке. В качестве затравок использованы монокристаллические и блочные затравки из сплавов систем Fe–Cr и Ni–W.



Рис. 1. Керамическая форма

В процессе направленной кристаллизации изменяли температуры нагрева металла и формы, а также скорость перемещения формы в жидкометаллический охладитель. Определяли химический состав полученных заготовок с направленной структурой, содержание примесей и газов, контролировали фазовый состав методом оптической металлографии.

Для обработки заготовок магнитов из сплава ЮНДКБА со столбчатой зеренной структурой на высококоэрцитивное состояние проводили гомогенизационный отжиг при температуре существования однофазного  $\alpha$ -твердого раствора, а затем термомагнитную обработку с последующим отпуском. При термомагнитной обработке сильномагнитные частицы  $\alpha_1$ -фазы выделяются вдоль приложения магнитного поля, тем

самым обеспечивая магнитную текстуру в материале. При отжиге компоненты между  $\alpha_1$ - и  $\alpha_2$ -фазами окончательно перераспределяются, что обеспечивает высокий уровень магнитных свойств.

После направленной кристаллизации анализировали микроструктуру полученных магнитов с использованием оптического микроскопа при увеличениях  $\times 100$ ,  $\times 200$ ,  $\times 500$  и  $\times 1000$ . Для выявления микроструктуры проводили травление трехкислотным травителем ( $92\text{HCl} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

Для определения отклонения кристаллографического направления  $\langle 001 \rangle$  зерен от оси отливки провели рентгеновский контроль с использованием дифрактометра ДРОН-4.

Магнитные свойства определяли методом медленно меняющегося поля на гистерезисграфе Permagraph C-300, предназначенном для измерения параметров петли гистерезиса ферромагнитных материалов с коэрцитивной силой  $> 20$  кА/м в магнитном поле напряженностью до 400 кА/м.

Структуру высококоэрцитивного состояния исследовали с использованием просвечивающей электронной микроскопии на электронном микроскопе JEM-1400 фирмы Jeol.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Результаты и обсуждение

Состав полученного сплава ЮНДКБА соответствовал требованиям ГОСТ 17809–72. Содержание основных компонентов, %:

Al	Ni	Cu	Co	Ti	Nb	Si	S	Fe
7,5–8,7	12,5–15	3–4,5	25	До 0,3	До 0,15	До 0,6	До 1	Остальное

Содержание примесных элементов не превышало 1 % для каждого.

Результаты, представленные в таблице, позволяют оценить степень влияния параметров направленной кристаллизации, состава и типа затравок на выход годного по магнитным свойствам постоянных магнитов из сплава ЮНДКБА.

**Параметры направленной кристаллизации  
и выход годного для магнитов из сплава ЮНДКБА**

Условный номер плавки	Скорость роста фронта, мм/мин	Затравка		Кристаллографическая ориентация, градус	Коэрцитивная сила по индукции, кА/м	Остаточная индукция, Тл	Максимальное энергетическое производство, кДж/м <sup>3</sup>	Выход годного, %
		Состав	Тип*					
1	5	Fe–Cr	М	2–4	64	1,27	60	91,49
2	5	Fe–Cr	М	2–5	60	1,27	59	83,72
3	8	Ni–W	Б	5–7	53	1,26	57	64,39
4	10	Fe–Cr	Б	4–6	52	1,26	57	50,00
5	10	Ni–W	Б	5–7	50	1,25	56	48,86
6	7	Ni–W	М	4–6	50	1,26	56	58,41
7	5	Ni–W	Б	5–7	48	1,25	56	43,42
8	7	Fe–Cr	М	2–4	57	1,27	57	79,43
9	7	Fe–Cr	Б	3–6	58	1,27	59	87,18
10	5	Fe–Cr	М	2–5	56	1,26	58	94,61
11	5	Fe–Cr	М	2–4	65	1,28	60	97,79
12	5	Fe–Cr	М	2–4	64	1,27	59	96,98
13	5	Fe–Cr	М	2–4	63	1,28	60	94,30
Требования по ГОСТ 17809–72					44–62	1,25–1,4	56–60	–

\* Монокристаллическая (М) и блочная (Б) затравки.

Для достижения высокого уровня эксплуатационных характеристик при изготовлении магнитов из сплава ЮНДКБА использовали технологию направленной кристаллизации, которая обеспечивает получение в постоянных магнитах монокристаллической структуры с заданной кристаллографической ориентацией. Применение вакуумных установок высокоградиентной направленной кристаллизации типа УВНС и УВНК позволяет повысить выход годного для магнитов из сплава ЮНДКБА. Однородная структура сплава формируется благодаря уменьшению на фронте кристаллизации жидкофазной области, что обеспечивает подпитку расплавом оснований дендритов и снижение ликвации элементов [40]. Температуры заливки, перегрева, верхнего и нижнего нагревателей составили  $1600 \pm 10$  °С.

На рис. 2 представлена макроструктура отливок из плавки 5 и 11 с блочной и монокристаллической затравками соответственно.

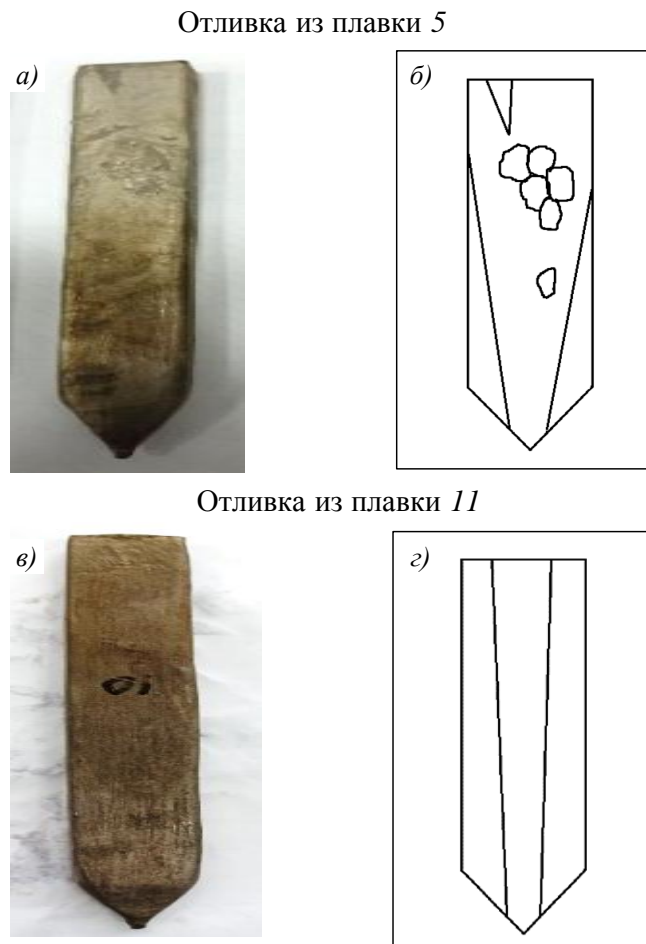


Рис. 2. Внешний (а, в) и схематический (б, г) виды макроструктуры отливок из плавки 5 и 11

Для обеспечения заданной кристаллографической ориентации отливкам постоянных магнитов из сплава ЮНДКБА, а также оценки влияния состава и типа затравок на процент выхода годного использованы затравки из сплавов систем Fe–Cr и Ni–W с монокристаллической и блочной структурой с разориентацией блоков не более 5 градусов [41, 42]. Затравки получают методом ориентированной вырезки из заготовок произвольной ориентации. В авиационном двигателестроении к затравкам предъявляют следующие требования [43]:

– должны изготавливаться из того же сплава, что и отливка;  
– материал затравки должен иметь более высокую температуру плавления, чем отливка; такую же кристаллографическую ориентацию, близкий период решетки и высокую коррозионную стойкость. Материал затравки не должен испытывать фазовых превращений при охлаждении с высоких температур. В печи форма с затравкой располагается таким образом, чтобы затравка не могла полностью расплавиться и не выполняла функции холодильника.

Для производства постоянных магнитов из сплава ЮНДКБА используют затравку из материала, из которого изготовлен сплав [44], либо схожего состава без титана [45]. Недостатки данного способа:

- повышенная стоимость затравки;
- затравка испытывает фазовые превращения при охлаждении;
- из-за особенности конструкции печи УВНК-9А затравку приходится делать более высокой.

Использование затравок из сплава системы Ni–W обусловлено их серийным применением при направленной кристаллизации никелевых жаропрочных сплавов. Такие затравки имеют более высокую температуру плавления, чем сплавы ЮНДКБА и жаропрочные сплавы, и не испытывают превращений при повышенной температуре плавления, согласно фазовой диаграмме.

При использовании блочных затравок процент выхода годного снижается. Кроме того, для таких затравок характерна разориентация зерен от плоскости  $\langle 001 \rangle$ , что увеличивает вероятность передачи «паразитной» ориентации при отборе кристаллов. Для монокристаллических затравок с кристаллографической ориентацией  $\langle 001 \rangle$  зарождающиеся зерна приобретают необходимую ориентацию, направленную в сторону магнитной направляющей  $\langle 001 \rangle$ .

### Заключения

Установлена возможность промышленного изготовления литых высокоэнергетических постоянных магнитов из сплава ЮНДКБА с использованием печи УВНК-9А, предназначенной для высокоградиентного литья с направленной кристаллизацией лопаток газотурбинных двигателей. Выход годного по магнитным свойствам составил  $>80\%$ .

Монокристаллические затравки из сплава системы Fe–Cr обеспечивают малый угол отклонения кристалла от кристаллографического направления  $\langle 001 \rangle$ , а также значительно повышают выход годного по структуре по сравнению с затравками из сплава системы Ni–W, что приводит к увеличению выхода годного на 30–55 %.

Минимальная скорость перемещения формы при проведении высокоградиентной направленной кристаллизации составляет 5 мм/мин, что способствует образованию более совершенной столбчатой структуры без равноосных зерен и обуславливает увеличение выхода годного на 30–55 %.

Термическая обработка магнитов на высококоэрцитивное состояние с учетом описанных ранее параметров позволяет получать магниты, значения коэрцитивной силы которых превышают требования ГОСТ 17809–72.

### Благодарности

Коллектив авторов выражает благодарность за творческий вклад начальнику сектора, к.т.н. Е.М. Висик и заместителю начальника лаборатории НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ Е.В. Колядову.

## Список источников

1. Чередниченко И.В., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Кузьмина Н.А., Шубаков В.С., Жуков Д.Г. Структура и свойства сплавов для постоянных магнитов ЮНДК25БА, полученных методом направленной кристаллизации с жидкометаллическим охладителем // Труды ВИАМ. 2017. № 11 (59). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.07.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-4-4.
2. Альтман А.Б., Верниковский Э.Е., Герберг А.Н. Постоянные магниты: справочник. М.: Энергия, 1980. 478 с.
3. Кекало И.Б. Физическое материаловедение прецизионных сплавов. М.: Metallurgia, 1989. 497 с.
4. Чумаков В.А., Степанов В.М., Верин А.С. Технология литья лопаток газотурбинных двигателей по методу направленной кристаллизации // Литейное производство. 1978. № 1. С. 23–24.
5. Герасимов В.В., Висик Е.М., Колядов Е.В. О неиспользованных резервах направленной кристаллизации в повышении эксплуатационных характеристик деталей ГТД и ГТУ // Литейное производство. 2013. № 9. С. 30–32.
6. Колядов Е.В., Герасимов В.В. Влияние приведенного размера отливки на осевой градиент температуры и макроструктуру отливок при направленной кристаллизации на установке УВНК-15 // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3. С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-3-9.
7. Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М., Демонис И.М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД // Труды ВИАМ. 2013. № 3. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.08.2023).
8. Колядов Е.В., Висик Е.М., Герасимов В.В., Аргинбаева Э.Г. Влияние параметров направленной кристаллизации на структуру и свойства интерметаллидных сплавов // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-14-26.
9. Кузьмина Н.А., Остроухова Г.А. Блочность и субструктура в монокристаллических отливках никелевых жаропрочных сплавов // Труды ВИАМ. 2022. № 7 (113). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-13-26.
10. Каблов Е.Н., Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. История развития технологии направленной кристаллизации и оборудования для литья лопаток газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
11. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Крамер В.В. Разработка нового жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200 и технологии его производства для литья методом направленной кристаллизации рабочих лопаток перспективных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-11-18.
12. Колядов Е.В., Межин Ю.А. Автоматизация технологического процесса получения монокристаллических отливок из жаропрочных сплавов на установках типа УВНК // Труды ВИАМ. 2016. № 4. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-4-4.
13. Колядов Е.В., Герасимов В.В., Висик Е.М., Межин Ю.А. Литье методом направленной кристаллизации с управляемым градиентом температуры на фронте кристаллизации // Литейное производство. 2016. № 8. С. 24–26.
14. McCallum R.W., Lewis L.H., Skomski R. et al. Practical Aspects of Modern // Annual Review of Materials Research. 2014. No. 44. P. 451–477. DOI: 10.1146/aanurev-matsci-070813-113457.
15. Zhou L., Cuo W., Jonathan D.P. et al. On spinodal decomposition in alnico – A transmission electron microscopy and atom probe tomography study // Acta Materialia. 2018. No. 153. P. 15–22. DOI: 10.1016/j.actamat.2018.04.042.

16. Fan M., Liu Y., Ra R. et al. On the evolution of Cu–Ni-rich bridges of Alnico alloys with tempering // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2016. Vol. 420. P. 296–302. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.07.040.
17. Zhou L., Hamilton W.E.M., Liqin K. et al. Microstructure and coercivity in alnico 9 // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018. Vol. 471. P. 142–147. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.09.085.
18. Zhou L., Tang W., Ke L. et al. Microstructural and magnetic property evolution with different heat-treatment conditions in an alnico alloy // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 133. P. 73–80. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.05.012.
19. Rehman S.U., Jiang Q., Lei W. et al. Microstructures and magnetic properties of cast alnico 8 permanent magnets under various heat treatment conditions // *Physica B: Condensed Matter*. 2018. Vol. 552. P. 136–141. DOI: 10.1016/j.physb.2018.10.007.
20. Rehman S.U., Wei C., Huang Q. et al. Tailoring the microstructure, magnetic properties and interaction mechanisms of Alnico-Ta alloys by magnetic field treatment // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 857. P. 157. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157586.
21. Rehman S.U., Zubair A., Haq A. et al. Effects of Zr alloying on the microstructure and magnetic properties of Alnico permanent magnets // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. Vol. 442. P. 136–140. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.114.
22. Rehman S.U., Jiang Q., Ge Q. et al. Microstructure and magnetic properties of alnico permanent magnetic alloys with Zr–B additives // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. Vol. 451. P. 136–140. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.11.043.
23. Zubair A., Liu Z., Haq A. et al. Synthesis, magnetic and microstructural properties of Alnico magnets with additives // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. Vol. 428. P. 125. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.12.023.
24. Zhao J.T., Sun Y.L., Lydiaway L. et al. Correlations of phase structure and thermal stability for Alnico 8 alloys // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. Vol. 442. P. 208–211. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.118.
25. Zhang S.-D., Wang S., Chen S.-Y. et al. Structure and magnetic properties of alnico 8 ribbons // *Physica B: Condensed Matter*. 2020. Vol. 597. P. 412423. DOI: 10.1016/j.physb.2020.412423.
26. Zhang C., Li Y., Han X.-H. et al. Structure and magnetic properties of Alnico ribbons // *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2017. Vol. 451. P. 200–207. DOI: 10/1016/j.jmmm.2017.11.045.
27. Hosseini S.M., Novak P., Vesely M. et al. Positive temperature dependence of compressive properties in an AlNiCo poly-quasicrystal fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering // *Scripta Materialia*. 2020. Vol. 187. P. 169–174. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2020.06.023.
28. Rehman S.U., Huang Q., Sagar R. et al. Interaction mechanism, magnetic properties and microstructure of Ce–Fe–B-Alnico spark plasma sintered magnets // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021. Vol. 537. P. 168237. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168237.
29. Wang H.-W., Wang S., Cao Y.-F. et al. Structure and magnetic properties of alnico alloy doped  $\text{SmCo}_5\text{-}x\text{Cu}_x$  ribbons // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021. Vol. 528. P. 167821. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.167821.
30. Rehman S.U., Jiang Q., He L. et al. Microstructure and magnetic properties of NdFeB alloys by co-doping alnico elements // *Physics Letters A*. 2019. Vol. 383. P. 125878. DOI: 10.1016/j.physleta.2019.125878.
31. Han X.-H., Sun J.-B., Wang H.-W. et al. Excellent magnetic properties determined by spinodal decomposition structure of Alnico alloy doped  $\text{SmCo}_5$ -based ribbons // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 806. P. 1188–1199. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.07.336.
32. Rehman S.U., Jiang Q., He L. et al. Synthesis, microstructures, magnetic properties and thermal stabilities of isotropic alnico ribbons // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018. Vol. 466. P. 277–282. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.07.020.
33. Rehman S.U., Ouyang H., Jiang Q. et al. Magnetic properties, phase transition temperatures and microstructure of CeFeB-alnico ribbons // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019. Vol. 486. P. 165252. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.165252.

34. Шакиров И.В., Жуков А.С., Перевислов С.Н., Олисов А.В. Влияние режимов селективного лазерного сплавления на структуру сплава ЮНДК // *Физика металлов и металловедение*. 2022. Т. 123. № 3. С. 248–259.
35. Жуков А.С., Шакиров И.В., Олисов А.В. Структурно-механическое состояние сплава ЮНДК35, полученного методом селективного лазерного сплавления // *Металлург*. 2021. № 10. С. 72–77.
36. Новиков С.В., Рамазанов К.Н. Аддитивные технологии: состояние и перспективы: учебное пособие [Электронный ресурс]. Уфа: УГАТУ, 2022. URL: [https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/EI\\_izd/2022-41.pdf](https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/EI_izd/2022-41.pdf) (дата обращения: 05.08.2023).
37. Ляпков А.А. Полимерные аддитивные технологии: учебное пособие. Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2016. 114 с.
38. Huber C., Abert C., Bruckner F. 3D Print of Polymer Bonded Rare-Earth Magnets, and 3D Magnetic Field Scanning With an End-User 3D Printer // *Applied Physics Letters*. 2016. Vol. 109. No. 109 (16). P. 1–5. DOI: 10.1063/1.4964856.
39. Khazdozian H.A., Manzano J.S., Gandha K. et al. Recycled Sm–Co bonded magnet filaments for 3D-printing of magnets // *AIP Advances*. 2018. Vol. 8. P. 056722. DOI: 10.1063/1.5007669.
40. White E., Kassen A., Simsek E. Net shape processing of Alnico magnets by additive manufacturing // *IEEE Transaction on magnetics*. 2017. Vol. 53. P. 1–7. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2711965.
41. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных и интерметаллидных сплавов с монокристаллической структурой // *Вестник московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. № S2. С. 20–25.
42. Пикунов М.В., Беляев И.В., Сидоров Е.В. Кристаллизация сплавов и направленное затвердевание отливок. Владимир: ВГУ, 2002. 213 с.
43. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. М.: Наука, 2006. 632 с.
44. Способы выплавки с направленной кристаллизацией сплава системы Fe–Al–Ni–Co: пат. 2662004 Рос. Федерация; заявл. 14.11.17; опубл. 23.08.18.
45. Способ получения ориентированных монокристаллических затравок из сплавов с перетектическим превращением: пат. 2084561 Рос. Федерация; заявл. 05.03.94; опубл. 20.07.97.

#### References

1. Cherednichenko I.V., Bondarenko Yu.A., Kolodiazniy M.Yu., Kuzmina N.A., Shubakov V.S., Zhukov D.G. The structure and properties of permanent magnetic alloys UNDK25BA, manufacturing by directional solidification methods with liquid metal cooler. *Trudy VIAM*, 2017, no. 11 (59), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 03, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-4-4.
2. Altman A.B., Vernikovskiy E.E., Gerberg A.N. *Permanent magnets: a reference book*. Moscow: Energiya, 1980, 478 p.
3. Kekalo I.B. *Physical materials science of precision alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1989, 497 p.
4. Chumakov V.A., Stepanov V.M., Verin A.S. Technology of casting blades of gas turbine engines using the method of directional crystallization. *Liteynoe proizvodstvo*, 1978, no. 1, pp. 23–24.
5. Gerasimov V.V., Visik E.M., Kolyadov E.V. On unused reserves of directional crystallization in improving the performance characteristics of gas turbine engines and gas turbine units. *Liteynoe proizvodstvo*, 2013, no. 9, pp. 30–32.
6. Kolyadov E.V., Gerasimov V.V. The influence of the reduced size of the casting on the axial temperature gradient and the macrostructure of casting for directional solidification at the facility UVNK-15. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-3-9.
7. Kablov E.N., Gerasimov V.V., Visik E.M., Demonis I.M. Role of the directed crystallization in the resource-saving production technology of details of GTE. *Trudy VIAM*, 2013, no. 3, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 02, 2023).

8. Kolyadov E.V., Visik E.M., Gerasimov V.V., Arginbaeva E.G. The influence of directional solidification parameters on the structure and properties of the intermetallic alloys. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 01, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-14-26.
9. Kuzmina N.A., Ostroukhova G.A. Blockiness and substructure in single-crystal castings of nickel heat-resistant alloys. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 03, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-13-26.
10. Kablov E.N., Echin A.B., Bondarenko Yu.A. History of development of directional crystallization technology and equipment for casting blades of gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 07, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
11. Min P.G., Vadeev V.E., Kramer V.V. The development of the new VZhM200 superalloy and the technology of its production for casting of the advanced engines' blades by the directional crystallization. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 12, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-3-11-18.
12. Kolyadov E.V., Mezhin Yu.A. Automation of the technological process of single-crystal castings of superalloys on UVNK type installations. *Trudy VIAM*, 2016, no. 4, paper no. 4. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 14, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-4-4.
13. Kolyadov E.V., Gerasimov V.V., Visik E.M., Mezhin Yu.A. Casting by the method of directional crystallization with a controlled temperature gradient at the crystallization front. *Liteynoe proizvodstvo*, 2016, no. 8, pp. 24–26.
14. McCallum R.W., Lewis L.H., Skomski R. et al. Practical Aspects of Modern. *Annual Review of Materials Research*, 2014, no. 44, pp. 451–477. DOI: 10.1146/aanurev-matsci-070813-113457.
15. Zhou L., Cuo W., Jonathan D.P. et al. On spinodal decomposition in alnico – A transmission electron microscopy and atom probe tomography study. *Acta Materialia*, 2018, no. 153, pp. 15–22. DOI: 10.1016/j.actamat.2018.04.042.
16. Fan M., Liu Y., Ra R. et al. On the evolution of Cu–Ni-rich bridges of Alnico alloys with tempering // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 420, pp. 296–302. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.07.040.
17. Zhou L., Hamilton W.E.M., Liqin K. et al. Microstructure and coercivity in alnico 9. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 471, pp. 142–147. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.09.085.
18. Zhou L., Tang W., Ke L. et al. Microstructural and magnetic property evolution with different heat-treatment conditions in an alnico alloy. *Acta Materialia*, 2017, vol. 133, pp. 73–80. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.05.012.
19. Rehman S.U., Jiang Q., Lei W. et al. Microstructures and magnetic properties of cast alnico 8 permanent magnets under various heat treatment conditions. *Physica B: Condensed Matter*, 2018, vol. 552, pp. 136–141. DOI: 10.1016/j.physb.2018.10.007.
20. Rehman S.U., Wei C., Huang Q. et al. Tailoring the microstructure, magnetic properties and interaction mechanisms of Alnico-Ta alloys by magnetic field treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 857, p. 157. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157586.
21. Rehman S.U., Zubair A., Haq A. et al. Effects of Zr alloying on the microstructure and magnetic properties of Alnico permanent magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 442, pp. 136–140. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.114.
22. Rehman S.U., Jiang Q., Ge Q. et al. Microstructure and magnetic properties of alnico permanent magnetic alloys with Zr–B additives. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 451, pp. 136–140. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.11.043.
23. Zubair A., Liu Z., Haq A. et al. Synthesis, magnetic and microstructural properties of Alnico magnets with additives. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 428, pp. 125. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.12.023.

24. Zhao J.T., Sun Y.L., Lydiaway L. et al. Correlations of phase structure and thermal stability for Alnico 8 alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 442, pp. 208–211. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.118.
25. Zhang S.-D., Wang S., Chen S.-Y. et al. Structure and magnetic properties of alnico 8 ribbons. *Physica B: Condensed Matter*, 2020, vol. 597, p. 412423. DOI: 10.1016/j.physb.2020.412423.
26. Zhang C., Li Y., Han X.-H. et al. Structure and magnetic properties of Alnico ribbons. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2017, vol. 451, pp. 200–207. DOI: 10/1016/j.jmmm.2017.11.045.
27. Hosseini S.M., Novak P., Vesely M. et al. Positive temperature dependence of compressive properties in an AlNiCo poly-quasicrystal fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Scripta Materialia*, 2020, vol. 187, pp. 169–174. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2020.06.023.
28. Rehman S.U., Huang Q., Sagar R. et al. Interaction mechanism, magnetic properties and microstructure of Ce–Fe–B–Alnico spark plasma sintered magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, vol. 537, pp. 168237. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168237.
29. Wang H.-W., Wang S., Cao Y.-F. et al. Structure and magnetic properties of alnico alloy doped  $\text{SmCo}_5-x\text{Cu}_x$  ribbons. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, vol. 528, pp. 167821. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.167821.
30. Rehman S.U., Jiang Q., He L. et al. Microstructure and magnetic properties of NdFeB alloys by co-doping alnico elements. *Physics Letters A*, 2019, vol. 383, p. 125878. DOI: 10.1016/j.physleta.2019.125878.
31. Han X.-H., Sun J.-B., Wang H.-W. et al. Excellent magnetic properties determined by spinodal decomposition structure of Alnico alloy doped  $\text{SmCo}_5$ -based ribbons. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 806, pp. 1188–1199. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.07.336.
32. Rehman S.U., Jiang Q., He L. et al. Synthesis, microstructures, magnetic properties and thermal stabilities of isotropic alnico ribbons. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 466, pp. 277–282. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.07.020.
33. Rehman S.U., Ouyang H., Jiang Q. et al. Magnetic properties, phase transition temperatures and microstructure of CeFeB-alnico ribbons. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 486, p. 165252. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.165252.
34. Shakirov I.V., Zhukov A.S., Perevislov S.N., Olisov A.V. Influence of selective laser alloying modes on the structure of the UNDC alloy. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2022, vol. 123, no. 3, pp. 248–259.
35. Zhukov A.S., Shakirov I.V., Olisov A.V. Structural and mechanical state of the YUNDK35 alloy obtained by selective laser melting. *Metallurg*, 2021, no. 10, pp. 72–77.
36. Novikov S.V., Ramazanov K.N. *Additive technologies: state and prospects*: textbook. Ufa: UGATU, 2022. Available at: [https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El\\_izd/2022-41.pdf](https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022-41.pdf) (accessed: August 05, 2023).
37. Lyapkov A.A. *Polymer additive technologies*: textbook. Tomsk: Tomsk Polytech. Univ. Publ. House, 2016, 114 p.
38. Huber C., Abert C., Bruckner F. 3D Print of Polymer Bonded Rare-Earth Magnets, and 3D Magnetic Field Scanning With an End-User 3D Printer. *Applied Physics Letters*, 2016, vol. 109, no. 109 (16), pp. 1–5. <https://doi.org/10.1063/1.4964856>.
39. Khazdozian H.A., Manzano J.S., Gandha K. et al. Recycled Sm–Co bonded magnet filaments for 3D-printing of magnets. *AIP Advances*, 2018, vol. 8, p. 056722. DOI: 10.1063/1.5007669.
40. White E., Kassen A., Simsek E. Net shape processing of Alnico magnets by additive manufacturing // *IEEE Transaction on magnetics*, 2017, vol. 53, pp. 1–7. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2711965.
41. Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A. Development of the process of directional crystallization of gas turbine engine blades from heat-resistant and intermetallic alloys with a single-crystal structure. *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser.: Mashinostroyeniye*, 2011, no. S2, pp. 20–25.

42. Pikunov M.V., Belyaev I.V., Sidorov E.V. *Crystallization of alloys and directional solidification of castings*. Vladimir: VSU, 2002, 213 p.
43. Kablov E.N. *Cast blades of gas turbine engines: alloys, technologies, coatings*. Moscow: Nauka, 2006, 632 p.
44. *Methods of smelting with directional crystallization of an alloy of the Fe–Al–Ni–Co system*: pat. 2662004 Rus. Federation; appl. 14.11.17; publ. 23.08.18.
45. *Method for producing oriented single-crystalline seeds from alloys with peritectic transformation*: pat. 2084561 Rus. Federation; appl. 05.03.94; publ. 20.07.97.

#### Информация об авторах

**Чередниченко Игорь Валерьевич**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Бавина Марина Александровна**, студент ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (исследовательский университет)», mai@mai.ru

**Бондаренко Юрий Александрович**, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Шурыгин Владимир Дмитриевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Овчинников Алексей Денисович**, студент, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (исследовательский университет)», mai@mai.ru

**Галимуллин Салават Анварович**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

#### Information about the authors

**Igor V. Cherednichenko**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Marina A. Bavina**, Student, FSBEI of HE «Moscow Aviation Institute (National Research University)», mai@mai.ru

**Yuriy A. Bondarenko**, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Vladimir D. Shurygin**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Aleksey D. Ovchinnikov**, Student, FSBEI of HE «Moscow Aviation Institute (National Research University)», mai@mai.ru

**Salavat A. Galimullin**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 14.09.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.09.2023.  
The article was submitted 14.09.2023; approved and accepted for publication after reviewing 22.09.2023.