

І СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

УДК 621.74.045:669.24:621.981

Н. А. Лысенко¹, В. В. Клочихин¹, д-р техн. наук В. В. Наумик²¹АО «Мотор Сич», ²Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА CMSX-4PLUS

Химический состав жаропрочного никелевого сплава CMSX-4 PLUS соответствует требованиям стандарта ISO 17025. Механические (как до, так и после термообработки) и жаропрочные (после термообработки) свойства образцов ВНК соответствуют нормам ТУ производителя. Микроструктура исследованных образцов является типичной для жаропрочных никелевых сплавов как в литом, так и в термообработанном состоянии. Карбиды и карбонитриды методом оптической микроскопии не обнаружены, что характерно для структуры низкоуглеродистых сплавов. В процессе термической обработки происходит растворение эвтектической ($\gamma - \gamma'$)- фазы, выравнивается состав осей и межосных пространств дендритов.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, химический состав, направленная кристаллизация, макроструктура, микроструктура, механические свойства, жаропрочность.

Состояние вопроса

Ответственные литые детали для современного авиационного машиностроения изготавливаются методом высокоскоростной направленной кристаллизации (ВНК) из высокожаропрочных никелевых сплавов и должны соответствовать требованиям на прочность при всё более высоких рабочих температурах.

Система легирования современных жаропрочных никелевых сплавов, предназначенных для литья монокристаллических лопаток газотурбинных двигателей, дополнительно пополняется такими дорогостоящими элементами, как тантал, рений и рутений [1, 2].

Так, в последних сплавах российской разработки суммарное количество рения и рутения достигает 10–15 % [3, 4]. В Японии, США и Европе процесс разработки новых высокожаропрочных никелевых сплавов для газотурбинных авиационных двигателей новых поколений также идёт по пути дополнительного легирования их этими элементами. В результате, удельная стоимость сплавов стала соизмеримой с общей удельной стоимостью современных газотурбинных двигателей, которая составляет на сегодня 1,5...2,0 тыс. USD за 1 кг [5].

Современные мировые экономические и политические условия делают поставки в нашу страну из России как легирующих элементов, так и готовых жаропрочных никелевых сплавов последних поколений для монокристаллического литья практически не возможными. Альтернативой указанным сплавам для моно-

кристаллического литья лопаток авиационных двигателей являются современные американские жаропрочные никелевые сплавы типа CMSX-4 PLUS.

Основной материал исследований

На базе АО «Мотор Сич» провели исследование литых изделий, полученных методом высокоскоростной направленной кристаллизации из жаропрочного никелевого сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION» (США).

Входной контроль показал, что полученная партия жаропрочного никелевого сплава CMSX-4 PLUS по химическому составу соответствовала требованиям стандарта ISO 17025 (табл. 1).

Для определения механических и жаропрочных свойств из прутковой заготовки Ш 75 мм сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION» методом высокоскоростной направленной кристаллизации (ВНК) на установке типа УВНК-9А были получены литые образцы ($\varnothing 15$ мм; $L = 135$ мм).

Общее исследование макроструктуры и монокристалличности образцов проводили путём визуального осмотра после химического травления их поверхности (рис. 1). Установлено, что на 4-х из 12-ти образцов получена монокристаллическая макроструктура. Структура на остальных образцах состоит из нескольких макрокристаллов – направленная.

Таблица 1 – Химический состав жаропрочного никелевого сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION»

Источник	Содержание элементов, % по массе									
	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Nb	Ta	Re	Ti
CMSX-4 PLUS	0,04	3,45	9,55	5,56	0,60	5,71	< 0,05	8,10	4,80	0,82
Нормы ISO 17025	≤ 0,075	3,2-3,5	9,3-9,9	5,3-5,7	0,5-0,7	5,6-5,8	≤ 0,1	8,1-8,3	4,7-4,9	0,8-0,9
Источник	Содержание элементов, % по массе									
	Fe	Si	S	P	B	Pb	Bi	O ₂	N ₂	
CMSX-4 PLUS	< 0,02	< 0,04	0,002	0,002	< 0,02	0,0002	0,0002	0,001	0,0045	
Нормы ISO 17025	≤ 0,15	≤ 0,04	≤ 0,004	≤ 0,020	≤ 0,03	≤ 0,001	≤ 0,0002	≤ 0,004	≤ 0,005	

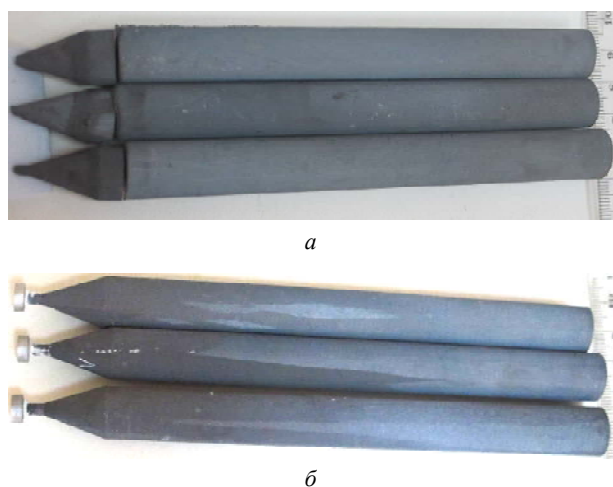


Рис. 1. Общая макроструктура образцов, отлитых методом высокоскоростной направленной кристаллизации (ВНК) из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION»:

a – монокристаллическая; *б* – направленная

Определение кристаллографической ориентации (КГО) отливок осуществляли методом рентгеноструктурного анализа при помощи дифрактометра ДРОН-3 на стартовых конусах, отрезанных от каждой отливки образца с монокристаллической структурой. При этом плоскость поперечного реза была перпендикулярна продольной оси отливки. Рентгенсъёмку проводили на поперечной поверхности шлифа конуса, протравленной для выявления дендритной микроструктуры.

Установлено, что значения отклонения направления [001] от оси *Z* для полученных монокристаллических образцов составляют соответственно 1,1; 3,5; 3,8 и 15,1 угл. град.

На рис. 2 показана макроструктура опытных образцов из сплава CMSX-4 PLUS при увеличении до $\times 16$: монокристаллических и направленно закристаллизованных с наличием нескольких кристаллов, ориентированных в осевом направлении (по оси *Z*). В поперечном сечении образцов чётко просматриваются дендриты макрокристаллов в виде регулярно расположенных «крестов» (см. рис. 2*в*, *г*, *д*, *е*).

Механические и жаропрочные свойства определяли на образцах $\varnothing 15$ мм, отлитых из сплава CMSX-4 PLUS методом ВНК (как до, так и после термической обработки).

Термообработку проводили по следующему режиму:

- гомогенизация в вакууме при температурах – 1316 °С (2 ч) + 1321 °С (2 ч) + 1327 °С (2 ч) + 1332 °С (6 ч) + 1338 °С (8 ч) + 1341 °С (4 ч) – далее охлаждение;
- старение при температуре 1163 °С (6 ч) – охлаждение на воздухе;
- старение при температуре 871 °С (20 ч) – охлаждение на воздухе.

Результаты механических испытаний и испытаний на длительную прочность приведены в таблицах 2 и 3.

Из представленных данных видно, что механические свойства никелевого сплава CMSX-4 PLUS (как до, так и после термообработки) и жаропрочные свойства термообработанных образцов находятся на уровне значений сертификата и соответствуют нормам ТУ Cannon-Muskegon для сплава CMSX-4 PLUS. Следует отметить, что они также удовлетворяют требованиям, предъявляемым ТУ1-92-177-91; 18Т-ТУ-158; 18Т-ТУ-187 – для широко распространённого при изготовлении монокристаллических отливок сплава ЖС32-В1.

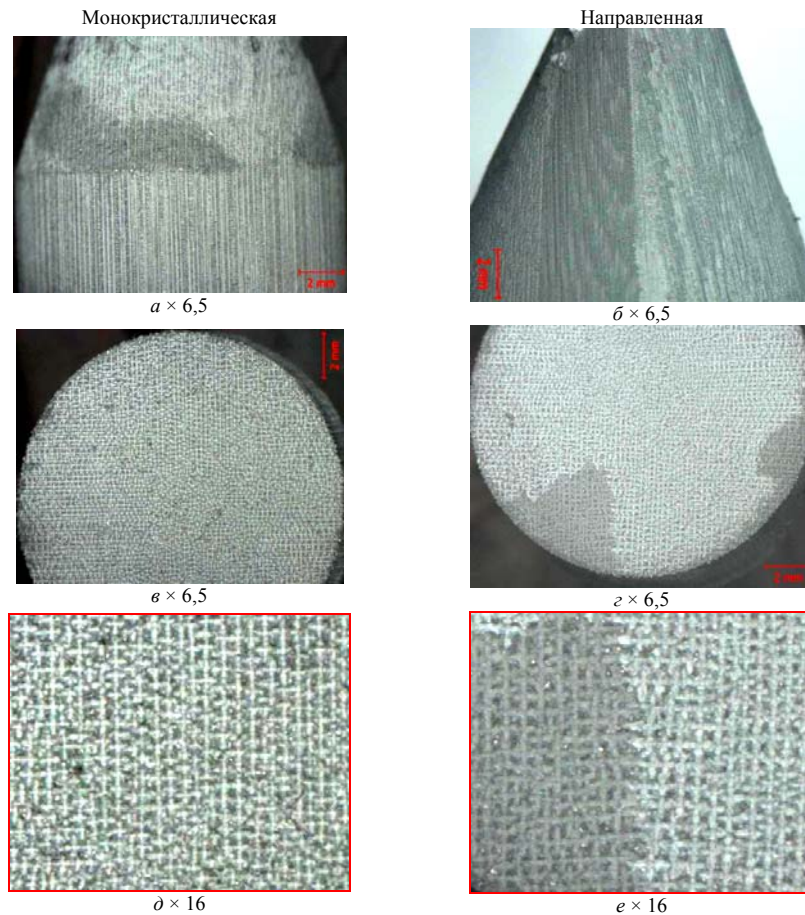
Жаропрочность нетермообработанных образцов с направленной структурой была значительно ниже значений длительной прочности термообработанных монокристаллических образцов.

Изломы образцов, отлитых из сплава CMSX-4 PLUS методом ВНК, прошедших термическую обработку, после испытаний на растяжение при комнатной температуре имеют складчатое, скользкое строение (рис. 3).

В материале нетермообработанных образцов, полученных методом высокоскоростной направленной кристаллизации, обнаружена микропористость с размером микропор до ~ 55 мкм и единичные оксидные включения – до 1 мкм (рис. 4*а*). Кроме того, в сплаве имеются мелкие, редко встречающиеся включения оксинитридов и нитридов размером до ~ 3 мкм (см. рис. 4*б*, *в*). Карбиды методом оптической микроскопии при увеличении до $\times 1000$ не обнаружены.

Таблица 2 – Механические свойства сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION»

Структура	Состояние материала	Механические свойства при 20 °С		
		$\sigma_{в}$, кгс/мм ²	δ , %	Ψ , %
направленная	без термообработки	120,0	11,6	13,9
		108,0	11,2	13,5
монокристаллическая	после термообработки	93,5	18,0	16,1
Нормы ТУ Cannon-Muskegon		$\geq 90,0$	$\geq 6,0$	$\geq 6,0$

**Рис. 2.** Макроструктура опытных образцов из сплава CMSX-4 PLUS, полученных методом высокоскоростной направленной кристаллизации: *a, б* – поверхность в продольном направлении; *в, з, д, е* – в поперечном сечении**Таблица 3** – Жаропрочные свойства сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION»

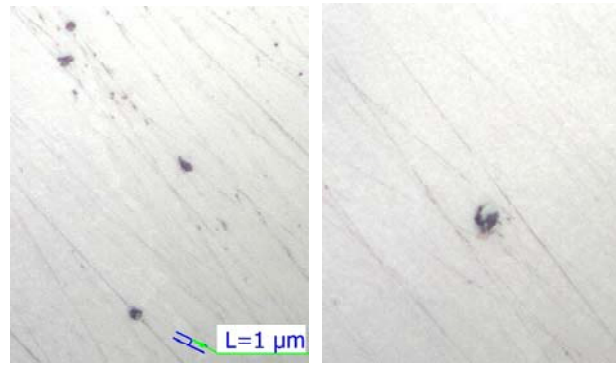
Структура	Состояние материала	Нагрузка, σ , кгс/мм ²	Температура испытания, t , °С	Время до разрушения, τ_p , ч
направленная	без термообработки	1000	28	89,5
		1050	24	34,5
		1100	15,67	56,0
монокристаллическая	после термообработки	1000	28	189,5; 171,6
		1050	24	76,0; 91,0
		1100	15,67	112,0; 117,5
данные Cannon-Muskegon по сертификату (после T/O)		1050	24	94,2; 78,2
Нормы ТУ Cannon-Muskegon		1050	24	$\geq 45,0$
		1100	15,67	$\geq 100,0$



Рис. 3. Стрoение излома монокристаллического термообработанного образца, отлитого из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION» после испытаний на растяжение при комнатной температуре, $\times 10$

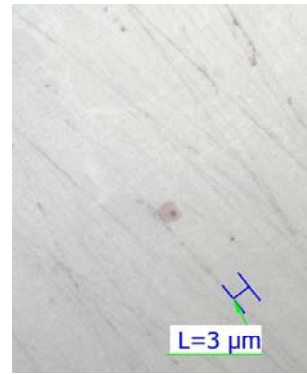
Микроструктура литых образцов ВНК $\varnothing 15$ мм из сплава CMSX-4 PLUS (без термообработки) имеет дендритно-ячеистую структуру, сформированную дендритами первого и второго порядков (рис. 5). В литой структуре наблюдается размерная и морфологическая неоднородность частиц γ' - фазы: в междендритных областях они заметно крупнее (рис. 5з). Размер частиц интерметаллидной γ' - фазы в осях дендритов нетермообработанных образцов составляет $\sim 0,36 \dots 0,55$ мкм; в междендритных пространствах — $\sim 0,83 \dots 1,39$ мкм.

В структуре также имеется значительное количество эвтектической фазы типа ($\gamma - \gamma'$) размером до 90 мкм, располагающейся в междендритных пространствах (см. рис. 5, табл. 4).



a

б



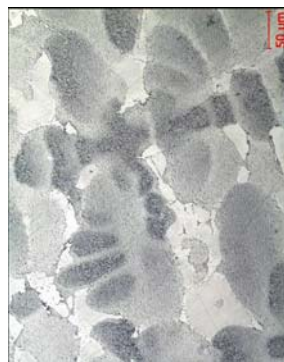
в

Рис. 4. Неметаллические включения в материале образцов, отлитых из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION» (до термообработки), $\times 1000$:

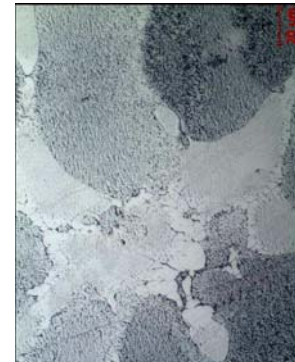
a – оксиды; *б* – оксинитриды; *в* – нитриды



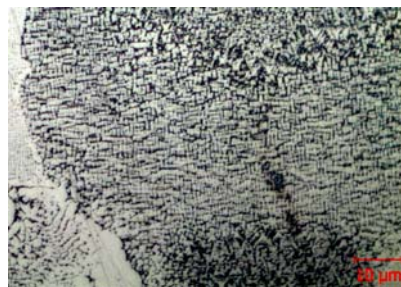
a $\times 50$



б $\times 200$



в $\times 500$



з $\times 1000$

Рис. 5. Микроструктура образцов $\varnothing 15$ мм, отлитых из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION» без термообработки

Дендритно-ячеистое строение монокристаллических отливок и отливок с направленно закристаллизованной структурой (имеющих несколько кристаллов) из сплава CMSX-4 PLUS является типичным для жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом направленной кристаллизации.

Гомогенизация при температуре 1316...1341 °С с последующим двойным старением (по указанному выше режиму) способствует повышению однородности сплава вследствие практически полного растворения в γ - твердом растворе эвтектической ($\gamma - \gamma'$)-фазы, а также выравнивания состава между осями и межосными пространствами дендритов (рис. 6).

В микроструктуре выявлены единичные, редко встречающиеся частицы эвтектики, вытянутые в направлении кристаллизации (по оси Z) длиной до ~ 90 мкм (рис. 7) редко встречающиеся включения оксидов размером до ~ 3 мкм (см. табл. 4). Карбиды в структуре не обнаружены. Интерметаллидные частицы γ' - фазы в осях и междендритных пространствах имеют примерно одинаковые размеры. Форма γ' - частиц – кубоидная; на малоугловых границах монокристаллов сформировались частицы γ' - фазы неправильной формы (рис. 8).

Таблица 4 – Размеры структурных составляющих в материале образцов, отлитых из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION»

Состояние материала	Размер структурных составляющих, мкм			Расстояние между осями дендритов, мкм	
	эвтектика типа ($\gamma - \gamma'$)	оксиды	микропоры	I порядка	II порядка
без термообработки	10...90	до 2 (редко)	до 55	268...335	32...58
после термообработки	до 90 (редко)	до 2 (редко)	до 55	233...318	30...50
после термообработки	–	до 3 (редко)	до 35	251...321	30...50



Рис. 6. Микроструктура образца $\varnothing 15$ мм, отлитого из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION» после термообработки

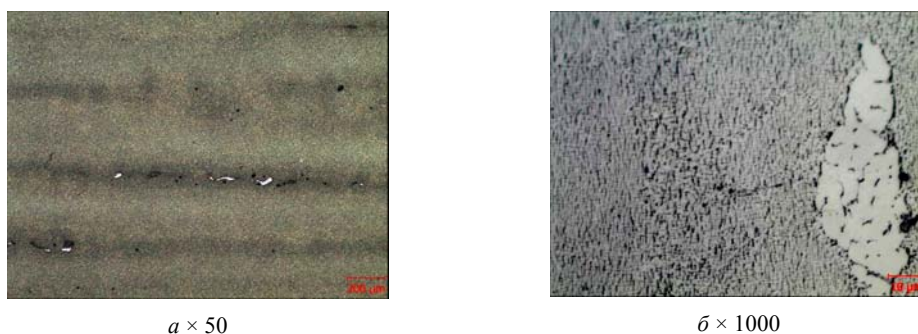


Рис. 7. Редко встречающиеся частицы эвтектической фазы типа ($\gamma - \gamma'$) в термообработанном образце из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION»



Рис. 8. Малоугловые границы зерен в монокристаллических образцах, отлитых из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION» после термообработки

Также в опытных образцах \varnothing 15 мм после термообработки наблюдается микропористость (см. табл. 4, рис. 9).



a $\times 50$



б $\times 200$

Рис. 9. Микропористость в образцах \varnothing 15 мм, отлитых из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION» после термообработки

Параметры микроструктуры исследуемых образцов \varnothing 15 мм, отлитых из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION», представлены в таблице 4.

Выводы

По химическому составу исследованная партия жаропрочного никелевого сплава CMSX-4 PLUS соответствует требованиям стандарта ISO 17025.

Монокристаллическая макроструктура получена на 4-х из 12-ти образцов, отлитых методом ВНК из сплава CMSX-4 PLUS. Отклонение направления [001] от оси Z составило от 1,1 до 15,1 угл. град.

Механические свойства никелевого сплава CMSX-4 PLUS (как до, так и после термообработки) и жаропрочные свойства термообработанных образцов находятся на уровне значений сертификата и соответствуют нормам ТУ Cannon-Muskegon для сплава CMSX-4 PLUS, а также ТУ1-92-177-91; 18Т-ТУ-158; 18Т-ТУ-187 – для сплава ЖС32-ВИ.

Жаропрочность нетермообработанных образцов с направленной структурой значительно ниже значений длительной прочности термообработанных монокристаллических образцов и не соответствует требованиям нормативно-технической документации.

Микроструктура образцов из сплава CMSX-4 PLUS ($C \leq 0,075\%$) является типичной для жаропрочных никелевых сплавов как в литом состоянии, так и после термообработки по режиму, указанному в ТУ Cannon-Muskegon для сплава CMSX-4 PLUS; перегрева нет.

Карбиды и карбонитриды методом оптической микроскопии при увеличениях до $\times 1000$ не обнаружены, что характерно для структуры низкоуглеродистых сплавов.

Гомогенизация при температуре 1316...1341 °С с последующим двойным старением (по указанному выше режиму) способствует повышению однородности сплава вследствие практически полного растворения в γ - твердом растворе эвтектической ($\gamma - \gamma'$)- фазы, а также выравнивания состава между осями и межосными пространствами дендритов.

Для материала исследуемых образцов характерно наличие микропористости с размером микропор до ~ 55 мкм.

Список литературы

1. Жаропрочные никелевые сплавы, получаемые методом монокристаллического литья / А. В. Логунов, И. М. Разумовский, В. Н. Ларионов и др. // Перспективные материалы. – 2008. – № 2. – С. 10–18.
2. Reed R.C. The superalloys. Fundamentals and Applications / R. C. Reed. – Cambridge, University Press. – 2006. – 372 p.
3. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С. Т. Кишкина. – Научно-техн. сб. – М.: Наука, 2006. – 272 с.
4. Логунов А. В. Тенденции разработки и применения Ni- суперсплавов для лопаток ГТД в современных и перспективных силовых установках авиационного назначения / А. В. Логунов, Ю. Н. Шамотин // ТЛС. – 2011. – № 4. – С. 11–17.
5. Логунов А. В. Методологические основы автоматизированного проектирования жаропрочных сплавов на никелевой основе (часть 2) / А. В. Логунов, Ю. Н. Шамотин, Д. В. Данилов // Технология металлов. – № 7 – 2014. – С. 3–11.

Отримано 06.11.2017

Лисенко Н.О., Ключихін В.В., Наумик В.В. Структура і властивості зразків, отриманих методом високошвидкісної спрямованої кристалізації з жароміцного сплаву CMSX-4PLUS

Хімічний склад жароміцного нікелевого сплаву CMSX-4 PLUS відповідає вимогам стандарту ISO 17025. Механічні (як до, так і після термообробки) і жароміцні (після термообробки) властивості зразків ВНК відповідають нормам ТУ виробника. Мікроструктура досліджених зразків є типовою для жароміцних нікелевих сплавів як у литому, так і в термообробленому стані. Карбіди і карбонітриди методом оптичної мікроскопії не виявлені, що характерно для структури низьковуглецевих сплавів. У процесі термічної обробки відбувається розчинення евтектичних ($\gamma - \gamma'$)- фази, вирівнюється склад осей і міжосних просторів дендритів.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав, хімічний склад, спрямована кристалізація, макроструктура, мікроструктура, механічні властивості, жароміцність.

Lysenko N., Klochikhin V., Naumyk V. Structure and properties of samples obtained by high-speed directional crystallization from the CMSX-4PLUS heat-resistant alloy

The chemical composition of the CMSX-4 PLUS heat resistant nickel alloy meets the requirements of the ISO 17025 standard. Mechanical properties (both before and after heat treatment) and heat-resistant (after heat treatment) properties of BHK samples conform to the manufacturer's specifications. The microstructure of the samples studied is typical of high-temperature nickel alloys, both in as cast and heat-treated state. Carbides and carbonitrides were not detected by optical microscopy, which is typical for the structure of low-carbon alloys. During the thermal treatment, the eutectic ($\gamma - \gamma'$)- phase dissolves, the composition of the axes and inter-axial dendritic spaces is equalized.

Key words: heat-resistant nickel alloy, chemical composition, directional crystallization, macrostructure, microstructure, mechanical properties, heat resistance.
