

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

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЗАГОТОВКИ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ДЛЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЛИТЬЯ CMSX-4 PLUS (США)

Качество материала прутковой заготовки из жаропрочного никелевого сплава CMSX-4 PLUS (США) соответствует требованиям ISO 17025 и технических условий фирмы-производителя. В материале исследованной заготовки грубые загрязнения металла в виде плен, крупных частиц шлаковых включений и их скоплений не обнаружены. Оксидные включения встречаются практически только в периферийной зоне верхней части заготовки. Микроструктура фрагментов прутковой заготовки из сплава CMSX-4 PLUS характерна для литого состояния высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, химический состав, макроструктура, кристаллизационные зоны, ликвация, микропористость, неметаллические включения, микроструктура.

Состояние вопроса

Современные жаропрочные никелевые сплавы для ответственных отливок авиационного машиностроения должны обеспечивать необходимую прочность при всё более высоких рабочих температурах, они характеризуются чрезвычайно сложной системой легирования и высокой стоимостью.

Стоимость современных газотурбинных двигателей составляет 1,5...2,0 тыс. USD за 1 кг, таким образом, удельная стоимость сплавов стала соизмеримой с ней [1].

Главное направление развития системы легирования современных жаропрочных никелевых сплавов, предназначенных для литья монокристаллических лопаток газотурбинных двигателей, связано с введением тантала и рения, а в последние годы – рутения [2, 3].

Рений входит в основном в γ - твердый раствор (содержание его в γ' - фазе невелико – около 0,2 %), способствуя при этом вытеснению из твердого раствора в γ' - фазу таких эффективно стабилизирующих ее элементов, как алюминий и тантал. Таким образом он повышает термостабильность не только матрицы, но и γ' - фазы [4].

Количество рения в сплаве ЖС 47 достигло 9 % [5], элемента платиновой группы рутения – 6 % [6], что привело к резкому повышению стоимости жаропрочных сплавов. Последние сплавы российской разработки легированы существенными количествами рения и рутения (сумма Re + Ru в сплаве ВЖМ-4–10 % и

ВЖМ-6–11 %). В Японии, США и Европе проблема создания газотурбинных двигателей для авиационной техники новых поколений также тесно связана с разработкой никелевых жаропрочных сплавов, легированных рением, или рением и рутением.

Современные экономические и политические условиями делают поставки, как легирующих элементов, так и готовых современных жаропрочных никелевых сплавов для монокристаллического литья из России практически не возможными.

Альтернативой указанным сплавам для изготовления монокристаллических лопаток современных авиационных двигателей являются американские жаропрочные никелевые сплавы типа CMSX-4 PLUS.

Основной материал исследований

На базе АО «Мотор Сич» провели исследование фрагментов (\varnothing 75 мм, h 20 мм), вырезанных из верхней, средней и нижней частей прутковой заготовки никелевого жаропрочного сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION» (США).

Данные литые прутковые (шихтовые) заготовки из сплава CMSX-4 PLUS (ISO 17025) были получены методом вакуумно-индукционной плавки, рафинированы и предназначены для дальнейшего изготовления отливок с монокристаллической макроструктурой.

Анализ химического состава фрагментов жаропрочного никелевого сплава CMSX-4 PLUS подтвердил их соответствие требованиям стандарта ISO 17025 (табл. 1).

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

Место отбора проб	Содержание элементов, % по массе									
	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Nb	Ta	Re	Ti
верх	0,05	3,44	9,54	5,66	0,58	5,74	<0,05	8,10	4,90	0,80
середина	0,04	3,44	9,53	5,53	0,60	5,75	<0,05	8,15	4,81	0,82
низ	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
	Fe	Si	S	P	B	Pb	Bi	O ₂	N ₂	
верх	<0,02	<0,04	0,002	0,002	<0,02	0,0001	0,0002	0,00107	0,00045	
середина	<0,02	<0,04	0,002	0,002	<0,02	0,0002	0,0002	0,00070	0,00045	
низ	<0,02	<0,04	0,002	0,002	<0,02	0,0002	0,0002	0,00100	0,00046	
Нормы ISO 17025	≤0,15	≤0,04	≤0,004	≤0,020	≤0,03	≤0,001	≤0,0002	≤0,004	≤0,005	

На поверхности исследованных фрагментов заготовки видимых дефектов не обнаружено.

В макроструктуре поперечных сечений верхней, средней и нижней частей заготовки из сплава CMSX-4 PLUS (рис. 1) наблюдаются зоны мелких подкорковых, столбчатых и равноосных кристаллов.

В центральной зоне средней части заготовки обнаружена осевая усадочная пористость диаметром до ~ 15 мм (рис. 1б); в нижней части – ликвационная неоднородность (рис. 1з).

Анализ макроструктуры исследованных фрагментов показал, что величина макрозерна по высоте заготовки из сплава CMSX-4 PLUS отличается:

- верхняя часть отличается мелкокристаллическим строением с размером зерен ~ 0,2...0,4 мм (см. рис. 1а);
- в средней части размер макрозерен составляет ~ 1...7мм (см. рис. 1б);
- в нижней части – около 0,5...1,5 мм (см. рис. 1в).

Результаты замера параметров макроструктуры приведены в таблице 2.



а



б



в



з

Рис. 1. Макроструктура в поперечном сечении различных частей заготовки Ш 75 мм из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION»:

а – верхняя часть; б – средняя часть; в – нижняя часть; з – ликвационная неоднородность в нижней части

Таблица 3 – Параметры структурных составляющих заготовки Ш 75 мм из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION»

Место замера		Размеры структурных составляющих, мкм				
		карбиды типа МС	эвтектика типа ($\gamma-\gamma'$)	оксиды	микропоры	расстояние между осями дендритов 2 ^{го} порядка
верх	край	до 2	3...30	до 55 (редко)	до 30	10...25
	центр	до 2	5...45	до 6	до 35	30...50
середина	край	до 1	7...30	до 8	до 20	18...35
	центр	до 1	10...90	до 5	до 50	50...90
низ	край	до 1	8...30	до 6	до 20	15...30
	центр	до 1	10...90	до 5	до 50	50...90



$a \times 200$



$b \times 1000$

Рис. 3. Оксидные включения в верхней части заготовки $\varnothing 75$ мм из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION»: a – край; b – центр

Карбиды в материале исследованных фрагментов практически отсутствуют, размер выявленных редко встречающихся мелких карбидных частиц составляет $\sim 1...2$ мкм (см. табл. 3), что характерно для структуры низкоуглеродистого сплава CMSX-4 PLUS ($C \leq 0,075\%$).

Параметры структурных составляющих в материале заготовки $\varnothing 75$ мм из сплава CMSX-4 PLUS представлены в таблице 3.

Микроструктура фрагментов прутковой заготовки $\varnothing 75$ мм из сплава CMSX-4 PLUS характерна для литого состояния никелевых высоколегированных жаропрочных сплавов и представляет собой γ - твердый раствор с наличием интерметаллидной γ' - фазы, эвтектической фазы типа ($\gamma-\gamma'$) (рис. 4–6).

В литой структуре наблюдается размерная и морфологическая неоднородность частиц γ' - фазы. При этом размер и форма γ' - частиц в осях и междендритных областях значительно различаются – в межосях частицы γ' - фазы значительно крупнее. Размеры эвтектической ($\gamma-\gamma'$)- фазы в центральной зоне заготовки составляют $\sim 45...90$ мкм и уменьшаются от центра к периферии (см. рис. 4–6; табл. 3).

Установлено, что в краевой зоне (столбчатых кристаллов) расстояние между осями дендритов примерно в ~ 3 раза меньше чем в центре исследуемых заготовок. Расстояние между осями дендритов второго порядка в краевой зоне составляет $10...35$ мкм, в центральной – $30...90$ мкм (см. табл. 3).

Металлографическими исследованиями центральной зоны нижней части заготовки установлено, что ликвационная неоднородность материала (рис. 1в) обусловлена образованием зональных выделений эвтектики типа ($\gamma-\gamma'$) в виде скоплений нескольких частиц размером $\sim 55...90$ мкм с наличием усадочной пористости (рис. 7).

Выводы

Качество материала прутковой заготовки $\varnothing 75$ мм из жаропрочного никелевого сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION» (США) соответствует требованиям ISO 17025 для сплава CMSX-4 PLUS и технических условий фирмы-производителя.

В материале исследуемой заготовки $\varnothing 75$ мм грубые загрязнения металла в виде плен, крупных частиц шлаковых включений и их скоплений не обнаружены. При этом следует отметить, что в периферийной зоне верхней части исследованного фрагмента заготовки имеются оксидные включения размером до 55 мкм. Далее по сечению заготовки, а также в средней и нижней её частях оксидные включения практически отсутствуют, размер редко встречающихся включений не превышает 8 мкм.

Микроструктура фрагментов прутковой заготовки $\varnothing 75$ мм из сплава CMSX-4 PLUS характерна для литого состояния никелевых высоколегированных жаропрочных сплавов.

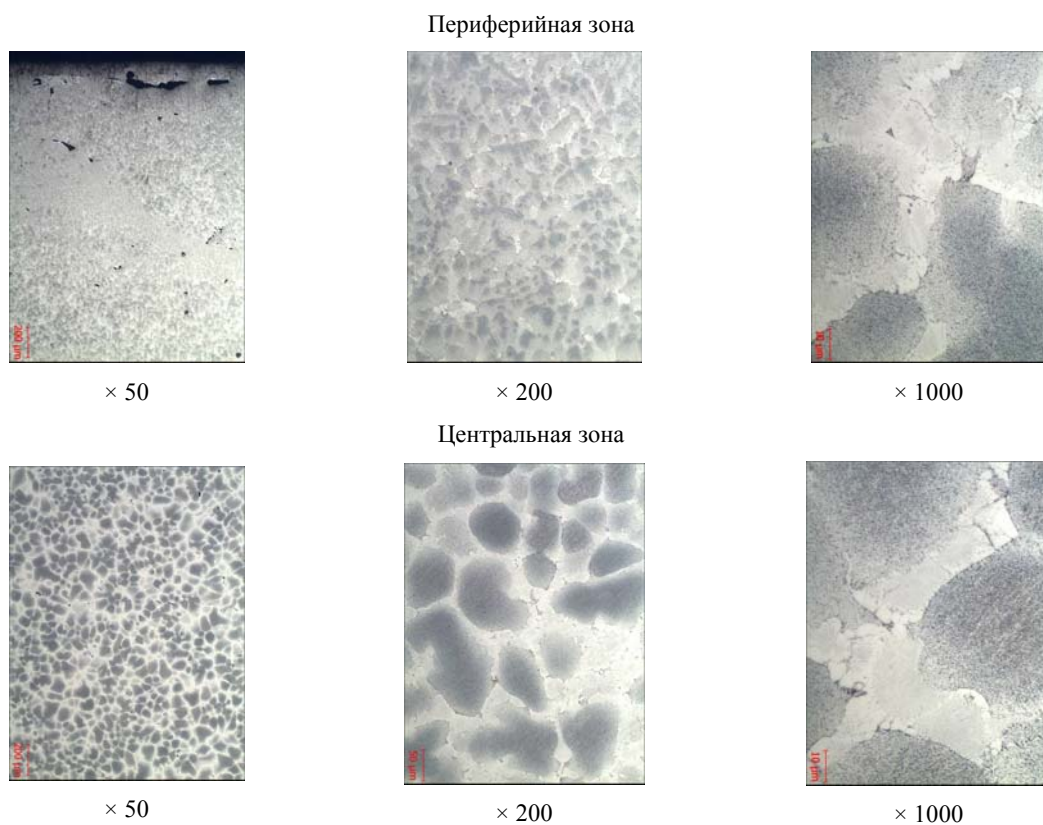


Рис. 4. Микроструктура фрагмента верхней части заготовки \varnothing 75 мм из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION»

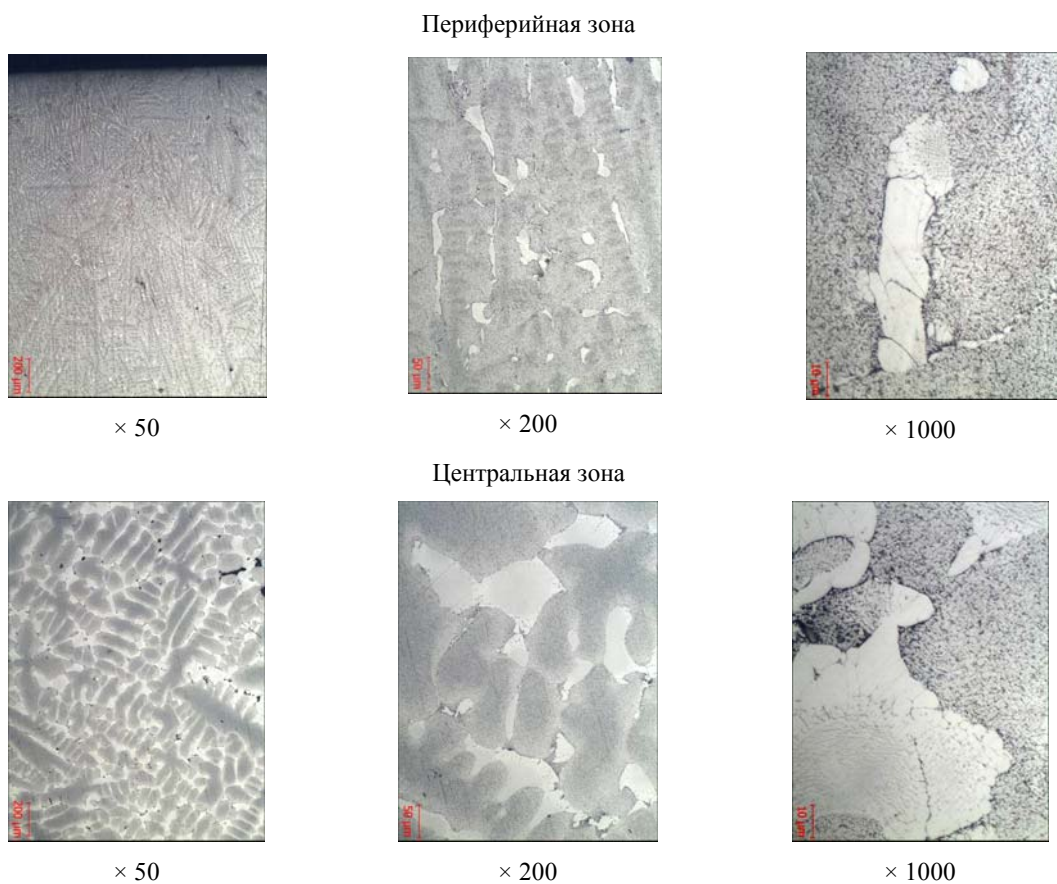


Рис. 5. Микроструктура фрагмента средней части заготовки \varnothing 75 мм из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION»

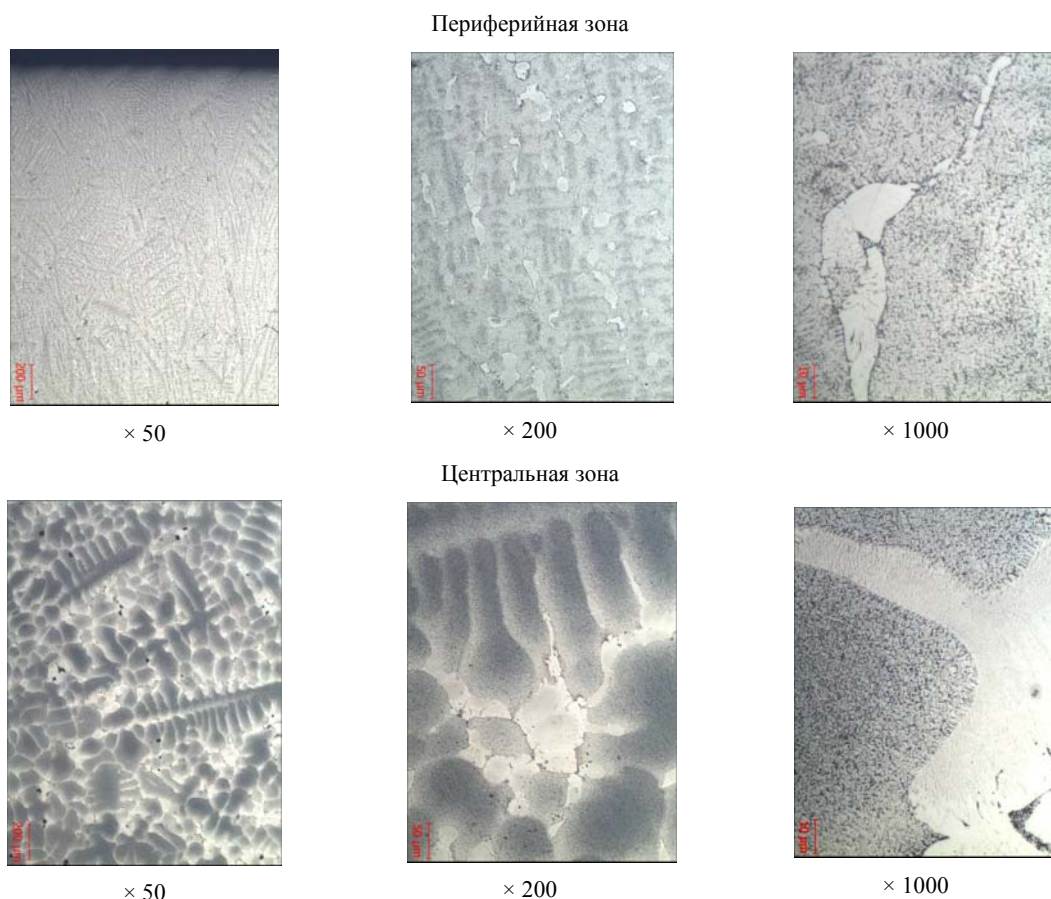


Рис. 6. Микроструктура фрагмента нижней части заготовки \varnothing 75 мм из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION»

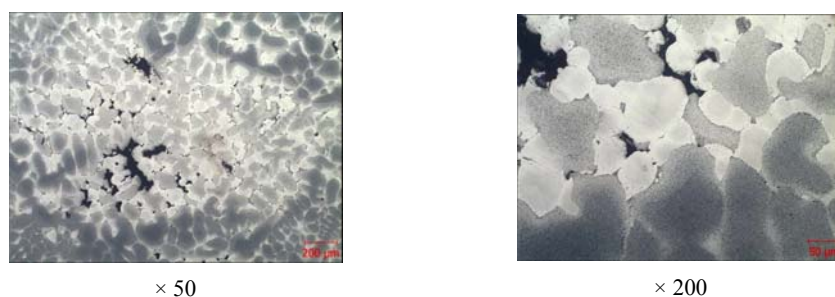


Рис. 7. Микроструктура ликвационной неоднородности в нижней части заготовки \varnothing 75 мм из сплава CMSX-4 PLUS производства фирмы «CANNON-MUSKEGON CORPORATION»

Список литературы

1. Логунов А. В. Методологические основы автоматизированного проектирования жаропрочных сплавов на никелевой основе (часть 2) / А. В. Логунов, Ю. Н. Шмотин, Д. В. Данилов // Технология металлов. – № 7. – 2014. – С. 3–11.
2. 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.
3. Reed R.C. The superalloys. Fundamentals and Applications / R.C. Reed. – Cambridge, University Press. – 2006. – 372 p.
4. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления / Патон Б. Е., Строганов Г. Б., Кишкин С. Т. и др. – К. : Наук. думка, 1987. – 256 с.
5. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С. Т. Кишкина. – Научно-техн. сб. – М. : Наука, 2006. – 272 с.
6. 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.

Одержано 16.06.2017

Лисенко Н.А., Клочихін В.В., Наумик В.В. Дослідження якості заготовки з жароміцного нікелевого сплаву для монокристалічного лиття CMSX-4PLUS (США)

Якість матеріалу пруткової заготовки з жароміцного нікелевого сплаву CMSX-4 PLUS (США) відповідає вимогам ISO 17025 та технічних умов фірми-виробника. У матеріалі дослідженої заготовки грубі забруднення металу у вигляді плівок, великих частинок шлакових вкраплень і їх скупчень не виявлені. Оксидні включення зустрічаються практично тільки в периферійній зоні верхньої частини заготовки. Мікроструктура фрагментів пруткової заготовки зі сплаву CMSX-4 PLUS характерна для литого стану високолегованих жароміцних нікелевих сплавів.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав, хімічний склад, макроструктура, кристалізаційні зони, ізоляція, мікропористість, неметалеві вкраплення, мікроструктура.

Lysenko N., Klochikhin V., Naumyk V. Investigation of the high-temperature nickel alloy for single-crystal casting CMSX-4PLUS (USA) billet quality

The quality of the bar billet material from the heat-resistant nickel alloy CMSX-4 PLUS (USA) complies with the requirements of ISO 17025 and the technical conditions of the manufacturer. In the material of the investigated billet, gross contamination of the metal in the form of a captive, large particles of slag inclusions and their clusters was not detected. Oxide inclusions are found practically only in the peripheral zone of the upper part of the billet. The microstructure of the fragments of the bar stock from the alloy CMSX-4 PLUS is typical for the cast state of high-alloy, high-temperature nickel alloys.

Key words: heat-resistant nickel alloy, chemical composition, macrostructure, crystallization zones, liquation, microporosity, non-metallic inclusions, microstructure.
