

УДК 621.983.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ШИХТОВЫХ ЗАГОТОВОК НА СТРУКТУРУ И КАЧЕСТВО ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ОТЛИВАЕМЫХ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

© 2004 Р. Заббаров, В. В. Уваров

Самарский государственный аэрокосмический университет

Проведено комплексное изучение влияния химического состава шихтовой заготовки различных поставок для производства лопаток газотурбинных двигателей на присутствие в лопатках углерода, серы, кислорода, азота и качество получаемых изделий. Установлены значения распределения общего количества металлургических дефектов в лопатках из шихты, поставляемой предприятиями России, Германии и Англии. Проведенные исследования позволяют заключить, что необходим входящий контроль химического состава шихтовых заготовок, включающий газовый анализ.

Важнейшими деталями современных газотурбинных двигателей (ГТД) являются лопатки турбин, эксплуатационные характеристики которых в значительной степени определяют рабочие параметры двигателей. Лопатки работают в высокотемпературном газовом потоке в условиях воздействия значительных нагрузок от центробежных сил, термических напряжений, подвергаются газовой коррозии и могут испытывать удары при эксплуатации. Для изготовления лопаток разработаны специальные жаропрочные сплавы на никелевой основе.

Одним из важнейших факторов, определяющих качество лопаток, является химический состав шихтовой заготовки сплавов типа ЖС. Шихтовые заготовки поставляются на предприятие несколькими изготовителями. Заготовки соответствуют стандартам по химическому составу, определяемым спектральным анализом в условиях заводской лаборатории. Однако при этом не контролируются газовые (азот, кислород) примеси и компоненты, требующие уточненного определения (углерод, сера). В то же время эти элементы во многом могут определять качество лопаток [1-3].

В связи с этим необходимо:

- выявление отличий в составах шихты различных поставщиков;
- установление закономерностей влияния этих различий на структуру и качество лопаток;
- изучение влияния защитной среды при

выплавке лопаток (вакуума, аргона) на их качество.

Каждая шихтовая заготовка при номинальном химическом составе отличается содержанием элементов (нижним и верхним пределами), а также наличием других компонентов. При этом не регламентируется газосодержание. Анализ всех элементов такого многокомпонентного сплава, как ЖС6Ф, достаточно сложен и трудоемок. Поэтому исследовались те элементы, которые наиболее полно определяют свойства лопаток: компоненты сплава шихты - углерод, сера, кислород и азот.

Анализ образцов шихты и лопаток проводился способом фирмы ЛЕКО по методике Института металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН. Массовые доли кислорода и азота в сплавах определялись методом восстановительного плавления в среде инертного газа (гелия). Для оценки содержания углерода и серы навеску из образца шихтового металла расплавляли в керамическом тигле и проводили ее анализ в специальных условиях. Для изучения структуры шихтовых заготовок и отлитых лопаток использовались стандартные методики микроструктурного анализа на оптических металлографических микроскопах типа МИМ-7 и МИМ-8.

Исследованию подвергались образцы шихты четырех различных поставок: А и Б - отечественная шихта, В - Германия (сплав SRR-99) и Г - Англия.

Таблица 1
Основные виды брака лопаток металлургического характера

Виды брака	Поставщик		Виды брака	Поставщик	
	Б	А		Б	А
Засоры	17,5	8,9	Трещины	3,8	0,9
Спаи	4,6	0,19	Макроструктура	16,6	4,5
Рыхлоты	0,4	1,7	Суммарный брак	45,1	17,59
Плены	2,2	1,4			

Таблица 2
Массовая доля углерода и серы в лопатках из шихты различных поставок

№ образца	C	S	№ образца	C	S
1	0,137	0,0010	5	0,145	0,0011
2	0,151	0,0008	6	0,150	0,0012
3	0,0225	0,0011	7	0,0163	0,0010
4	0,145	0,010	8	0,151	0,0007

Результаты исследований приведены в таблицах 1-5. Лопатки из различной шихты отливались в печи ПМП-2 по двум вариантам:

- по серийной технологии (таблицы 2, 3, образцы №№ 1-4 и №№ 9-12);
- с натеком аргона (таблицы 2, образцы №№ 5-8 и №№ 13-15).

В указанных таблицах последовательно приведены сверху вниз образцы поставок шихты А, Б, В и Г. Анализ макро- и микроструктур выявил следующее:

1. Микроструктура прутка шихты поставки А однородная и идентичная по сечению прутка и состоит из игольчатых и глобулярных карбидов в виде «иероглифов», частиц первичной упрочняющей γ' -фазы в виде кубиков размером до 0,3-0,5 мкм, выделений вторичной γ' -фазы в количестве около 10-15 %, расположенной между осями дендритов и равномерно распределенной по всему сечению, и небольшого количества (до 1 %) эвтектической составляющей на фоне

γ' -фазы. Дендриты мелкие, плотные и равномерные.

2. Микроструктура прутка шихты поставки Б имеет отличие от структуры прутка поставки А: карбиды в основном глобулярной формы, выделение избыточной фазы гораздо больше (около 30 %), частицы ее более крупные и количество эвтектической составляющей также значительно больше (до 5 -10 %). Дисперсность и распределение частиц вторичной упрочняющей γ' -фазы примерно одинаковое, величина частиц 0,5-0,7 мкм. В макроструктуре шихты поставки Б выявлена значительная неоднородность зерна и дендритов по сечению прутка; зерна крупные, вытянутые в радиальном направлении; в центральной части прутка зерна равноосные, более мелкие. Дендриты также более крупные, чем в прутке поставки. Имеется мелкая междендритная пористость.

3. Материал лопатки из шихты поставки А в литом состоянии имеет такую структуру, что и исходный пруток: карбиды в виде

Таблица 3
Массовая доля общего кислорода и азота в лопатках из шихты различных поставок

№ образца	O ₂	N ₂	№ образца	O ₂	N ₂
9	0,053	0,0046	13	0,0064	0,0037
10	0,0109	0,0040	14	0,0068	0,0046
11	0,0069	0,0044	15	0,0043	0,0046
12	0,053	0,0045	16	0,0174	0,0055

Таблица 4

Массовая доля углерода, серы, кислорода и азота в лопатках, отлитых по двум вариантам из различных шихтовых заготовок, %

Элемент	Серийная технология (вакуум)	С напуском аргона	Серийная технология (вакуум)	С напуском аргона
<i>1. ЖС6ФВИ, А</i>		<i>3. SRR-99, Германия, В</i>		
С	0,13	0,14	0,0225	0,0163
S	0,010	0,00	0,0011	0,0010
O ₂	0,0053	0,00	0,0069	0,0041
N ₂	0,046	0,00	0,0044	0,0046
<i>2. ЖС6ФВИ, Б</i>		<i>4. Типа ЖС6ФВИ, Англия, Г</i>		
С	0,15	0,150	0,145	0,151
S	0,0008	0,0012	0,0010	0,0007
O ₂	0,0109	0,0068	0,0053	0,0174
N ₂	0,0040	0,0046	0,0045	0,055

«иероглифов» глобулярной и игольчатой формы; избыточная фаза (до 10-15 %); эвтектика (до 1 %); частицы упрочняющей γ -фазы кубической формы размером 0,3 - 0,5 мкм в замке и 0,5 - 0,7 мкм на пере лопатки. Микрорыхлота не выявлена.

4. Микроструктура лопатки из шихты поставки Б следующая: карбиды глобулярной и игольчатой формы в виде «иероглифов»; избыточная фаза в количестве до 30 %; эвтектика 5-10 %. Частицы упрочняющей γ -фазы более крупные (до 0,7 - 1,0 мкм). Микрорыхлота не выявлена.

Анализ химического состава шихтовой заготовки различных поставок показал, что содержание углерода больше всего в сплаве ЖС6ФВИ (Англия), кислорода в сплаве ЖС6ФВИ (Б), серы и азота практически одинаково во всех поставках.

Последующий анализ полученных данных выявил:

1. Суммарный брак по металлургическим дефектам (засорам, срям, рыхлотам, пленам, трещинам и макроструктуре) в лопатках ГТД, выплавляемых из шихты, составил соответственно: поставок Б – 45,1 % и А – 17,59 %

2. Рентгеноструктурный анализ показал, что фазовый состав представляет γ -фазу, когерентно связанную с γ -фазой; наличие карбидов типа Me₂₃C₆ и боридов типа MoB₂.

3. При выплавке и литье лопаток в печи ПМП-2 с напуском аргона возрастает содер-

жание углерода и кислорода (вариант 2) по сравнению с серийной технологией (вариант 1). Содержание серы и азота практически не меняется.

4. Сопоставление химического состава отечественного литейного сплава марки ЖС6ФВИ и зарубежного сплава SRR-99 (MTS1162) показало, что последний имеет более низкое содержание углерода, более легирован хромом, содержит тантал и имеет пониженное содержание кобальта.

5. Сравнение свойств по техническим условиям и нормам показало, что по характеристикам длительной прочности сплав ЖС6ФВИ и MTS1162 имеют близкие значения. Вместе с тем, зарубежный сплав имеет более высокие значения характеристик пластичности, что обеспечивает лучшую обрабатываемость. Кроме того, сумма легирующих элементов в зарубежном сплаве на 11 % меньше по сравнению с отечественным сплавом, что также способствует повышению технологичности сплава.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что крайне необходим входной контроль химического состава шихтовой заготовки, включая газовый анализ.

Список литературы

1. Заббаров Р., Голанов С. П. Материалы и современные технологические процессы изготовления отливок и заготовок аэрокосмического назначения. // Научное издание. Самара: СГАУ, 2000.

Таблица 5

Химический анализ образца сплава SRR-99 (MTS 1162) и требований норм в сопоставлении со сплавом ЖС6ФВИ

Сплав	SRR-99, факт	SRR-99, норма	ЖС6ФВИ*	
Содержание элементов, % по массе	C	0,022	0,01-0,02	0,12-0,19
	Si	≤0,3	≤0,3	≤0,3
	Mn	≤0,01	≤0,01	≤0,01
	Ni	основа	основа	основа
	Cr	8,9	8,25 - 8,75	4,0 - 7,0
	Al	5,6	5,3 - 5,7	5,1 - 6,1
	Co	5,4	4,8 - 5,2	6,0 - 6,1
	W	9,3	9,25 - 9,75	11,0 - 13,0
	Ti	2,3	1,05-2,35	0,8 - 1,5
	Mo	0,1	≤0,5	0,8 - 1,5
	Nb	—	—	1,2 - 1,7
	Hf	—	≤0,05	1,0 - 1,5
	V	—	≤0,1	0,8 - 1,2
	В	—	≤0,025	0,0015
	Fe	—	≤0,1	1,0
	Ta	2,9	2,65 - 2,95	—
Прочие	Zr ≤ 0,01 Ce ≤ 0,01 Mg ≤ 0,03 Nb ≤ 0,001	Zr = 0,10 Y = 0,01 S = 0,01 P = 0,15 Ce = 0,03		

*- технические условия ТУ 1-92-177-91

2. Голанов С. П., Заббаров Р., Уваров В. В. Совершенствование технологического процесса литья рабочих лопаток ГТД с монокристаллической структурой.// Тезисы докладов международной научно-технической конференции, посвященной памяти генерального конструктора аэрокосмической техники

академика Кузнецова Н. Д. Самара: СГАУ, 2001.

3. Уваров В. В., Заббаров Р., Голанов С. П. Влияние химического состава шихтовых заготовок на структуру и свойства литых лопаток.// Литейное производство, № 10, 2002.

INFLUENCE OF INGOT BAR CHEMICAL COMPOSITION ON THE STRUCTURE AND QUALITY OF GAS TURBINE ENGINE BLADES CAST BY DIRECTED CRYSTALLIZATION

© 2004 R. Zabbarov, V. V. Uvarov

Samara State Aerospace University

The influence of chemical composition of ingot bars of different suppliers for the production of gas-turbine engine blades has been studied. The presence of carbon, sulphur, oxygen, nitrogen in the blades and the quality of the items produced were the objects of investigation. The values of the distribution of the total number of metallurgical defects in the blades made of ingot bars supplied by Russian, German and British companies are established. The investigation conducted makes it possible to conclude that it is necessary to check the chemical composition of the ingot bars supplied, including a gas analysis.