

УДК 621.74.04

Зеленюк А. Н., Наумик В. В., Елькин А. В.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗВРАТА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОТЛИВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖЛ12Э-ВИ

Газотурбинные двигатели работают в тяжелых условиях воздействия на их составляющие элементы высоких рабочих температур. Так известно [1], что рабочие температуры в современных газотурбинных двигателях достигают 1500 °С. Тенденция увеличения рабочих температур двигателя обусловлена тем, что повышение температуры газового потока, поступающего на лопатки турбин, на 50–60 °С позволяет увеличить мощность газотурбинного двигателя на 4–5 %. В процессе эксплуатации лопатки также подвержены воздействию центробежных сил от собственной массы и поперечным аэродинамическим нагрузкам.

Описанные условия работы деталей газотурбинных двигателей требуют тщательного подбора сплава для их производства.

Для производства деталей современных газотурбинных двигателей применяются высокопрочные литейные сплавы на никелевой основе, в состав которых входят хром, кобальт, титан, тантал, вольфрам и другие элементы [2]. Это обусловлено более высокой жаропрочностью данных сплавов и высоким коэффициентом использования материала [3]. При использовании дорогостоящих жаропрочных сплавов немаловажным для предприятия является экономический фактор.

Значительная часть сплава при заливке керамической формы заполняет литниковую систему и после отделения от нее готовых деталей становится технологическим возвратом (рис. 1). Таким образом, при непрерывном цикле литья постоянно накапливается определенный объем технологического возврата (заливочные чаши, стояки, питатели, брак), который необходимо передавать на металлургические комбинаты для последующей переработки.



Рис. 1. Технологический возврат

За последние 30 лет стала популярна практика использования технологического возврата собственного производства для литья деталей газотурбинных двигателей. Технологический возврат добавлялся в плавку в качестве шихты в различных процентных соотношениях со свежим сплавом.

Однако многократное использование технологического возврата для литья становилось основным источником загрязнения расплава нежелательными включениями эндогенного и экзогенного типа, что приводило к резкому повышению брака литья.

Поэтому, возникла необходимость в разработке технологии, позволяющей получать качественные заготовки с использованием технологического возврата. Разрабатываемая технология должна обеспечивать получение качественного слитка (рис. 2), как основного элемента технологического цикла с сохранением всех физико-механических свойств и соответствия химического состава нормам существующего стандарта (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав сплава ВЖЛ12Э-ВИ согласно ОСТ 1.90126-85

Ni	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	Ce	Zr
основа	0,12– 0,20	8,5– 10,0	8,0– 10,0	2,7– 3,4	1,0– 1,8	5,0– 5,7	4,2– 4,7	0,5– 1,0	0,015	0,02
B	Si	Mn	S	P	Pb	Bi	Fe	V	La	
0,015	0,4	0,4	0,015	0,015	0,001	0,0005	2,0	0,5– 1,0	0,01	



Рис. 2. Мерный слиток

Целью данного исследования является разработка и апробирование технологии многократного использования технологического возврата жаростойкого сплава в условиях литейного цеха. Исследуемый сплав относится к жаростойким сплавам, применяемым для литья деталей газотурбинных двигателей.

Проведен тщательный анализ технологического возврата для определения возможных направлений по его рафинированию и улучшению свойств.

Для исследования был выбран жаростойкий сплав ВЖЛ12Э-ВИ. Данный сплав закупался и поставлялся в литейный цех с металлургического комбината после рафинирования в виде мерного сертифицированного слитка. Такой слиток был взят за эталон для сравнения при получении образцов в условиях собственного производства.

Предварительный визуальный осмотр и химический анализ позволили установить, что технологический возврат, предполагаемый для использования в качестве шихты, загрязнен пригаром, пленочными включениями и, такими нежелательными элементами, как O, N, S, Si, Na, K и неметаллическими включениями Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, SiO<sub>2</sub>, Ti (C, N). Также, наблюдалась газовая пористость, заливочные чаши имели усадочные раковины.

Исходя из вышесказанного, можно определить основное направление разработки технологии как очистку расплава от вредных примесей и сохранение его физико-механических свойств.

Актуальность поставленной задачи по освоению технологии переработки возврата сплава ВЖЛ12Э-ВИ с точки зрения повышения качества литья и экономики предприятия в целом является очевидной. Использование 100 % технологического возврата от собственного производства позволит сократить расходы связанные с передачей возврата для переработки на металлургические комбинаты за рубежом и снизить затраты на объем закупки свежего сплава, а возможность контроля перерабатываемых (выплавляемых) сплавов дает возможность влиять на их качество повышая их физико-механические и литейные свойства.

Основными методами исследования были визуальный контроль применяемого технологического возврата сплава ВЖЛ12Э-ВИ. Определение химического состава, физико-механических свойств, а так же проведение длительных жаропрочных испытаний всех полученных образцов.

В процессе проведения опытов были изучены следующие технологические факторы:

- качество шихтовых материалов;
- термовременная обработка;
- заливка расплава.

Для исследования были взяты элементы литниковой системы (заливочные чаши, стояки, питатели, брак литья, детали, отработавшие свой ресурс) жаростойкого сплава ВЖЛ12Э-ВИ. Все используемые элементы шихты прошли предварительный визуальный контроль и химический анализ.

На установке УППФ-3М велась плавка сплава с использованием в плавке технологического возврата в следующих соотношениях:

50 % чистого сплава и 50 % технологического возврата (группа I);

20 % чистого сплава и 80 % технологического возврата (группа II).

Главной идеей проведения плавки было применение выбранного метода температурно-временного воздействия на расплав. Данный метод основывается на теории существования критических температур  $T_{к-1}$  и  $T_{к-2}$ . Эти температуры соответствуют процессам наиболее интенсивного разрушения неравновесных составляющих расплава и позволяют добиться его гомогенизации. Известно, что данные температуры индивидуальны, для каждого отдельно взято сплава [4], но их влияние на расплав требует дополнительного изучения. Для большинства сплавов на основе никеля интервал температуры  $T_{к-1}$  соответствует 1500–1700 °С, а  $T_{к-2}$  – находится в пределах 1700–1850 °С.

Плавка сплава ВЖЛ12Э-ВИ групп I-II велась в корундовом тигле емкостью 15 кг. Расплав перегревался выше температуры ликвидус более чем на 400 °С, что составляло порядка 1850 °С.

Данная температура была определена, как вторая критическая температура для сплава ВЖЛ12Э-ВИ. Введу того, что принятая температура превышает температуру плавления исследуемого сплава, возникла вероятность кипения расплава и выгорания легирующих элементов. С целью предотвратить кипение расплава и выгорание легирующих элементов в плавильной камере создавалась защитная среда аргона с давлением 115 мм рт. ст. Расплав, нагретый до температуры 1850 °С, выдерживался в течение 5–10 минут, после чего температура понижалась до температуры заливки (1450 °С ± 10 °С). Расплав заливался в кокиль для получения мерной заготовки, затем залитый кокиль выдерживался в вакууме около 10 мин, после чего переносился в специальные короба для дальнейшего остывания.

Из полученных мерных заготовок, по существующей технологии переплава, в керамические формы отлиты стандартные образцы. Все полученные образцы промаркированы номером плавки и отправлены в ЦЗЛ.

Результаты химического анализа по всем группам отлитых образцов представлены в табл. 2.

Анализируя данные, предоставленные в табл. 2, можно отметить, что в исследуемых группах I и II, по сравнению с образцами, полученными из сертифицированного слитка, есть незначительные отклонения в химическом составе, не выходящие за рамки требований ОСТ 1.90126-85. Содержание примеси серы и фосфора также невысоки, что немаловажно для обеспечения высокого уровня физических свойств получаемого сплава.

Таблица 2

Результаты химического анализа образцов сплава ВЖЛ12Э-ВИ, полученных с применением температурно-временного воздействия

Группа	№ образца	Al	Ti	W	Mo	Cr	Co	Nb	V	Fe	Mn	Si	C	S	P
Образцы из сертифицированного слитка	1	5,5	4,6	1,6	3	9,5	9	0,9	0,8	≤ 2	≤ 2	≤ 0,4	0,15	0,0039	≤ 0,005
	2	5,4	4,6	1,6	3,1	9,3	9	0,9	0,8				0,17		
	3	5,4	4,4	1,6	2,9	9,5	9	0,9	0,8				0,165		
	Среднее	5,4	4,5	1,6	3	9,4	9	0,9	0,8				0,16		
I (50/50%)	1	5,5	4,6	1,6	3	9,5	9	0,9	0,8	≤ 2	≤ 0,4	≤ 0,4	0,16	0,005	0,002
	2	5,6	4,54	1,57	3,1	9,3	9	0,9	0,8				0,15	0,004	
	3	5,5	4,34	1,69	2,9	9,5	9	0,9	0,8				0,15	0,002	
	Среднее	5,5	4,5	1,62	3	9,4	9	0,9	0,8				0,15	0,011	
II (20/80%)	1	5,5	4,6	1,6	3	9,5	9	0,9	0,8	≤ 2	≤ 0,4	≤ 0,4	0,16	0,005	0,002
	2	5,6	4,54	1,57	3,1	9,3	9	0,9	0,8				0,15	0,004	
	3	5,5	4,34	1,69	2,9	9,5	9	0,9	0,8				0,15	0,002	
	Среднее	5,5	4,5	1,62	3	9,4	9	0,9	0,8				0,15	0,011	

Следующим этапом исследования были длительные жаропрочные и механические испытания образцов по всем трем группам. Данный вид испытаний, позволяет оценить физико-механические характеристики полученных образцов. Опытные образцы всех групп простояли при температуре 975 °С под нагрузкой 20 кгс/мм<sup>2</sup> более 40 часов, что соответствует требованиям ОСТ. Результаты механических испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты механических испытаний опытных образцов

Группа	№ образца	Предел прочности, кгс/мм <sup>2</sup>	Удлинение, %	Поперечное сужение, %
Образцы из сертифицированного слитка	1	98,2	6,8	11,2
	2	95,5	6	8,5
	3	95,7	5,2	7,8
	среднее	96,4	6	9,1
I (50 / 50 %)	1	99,1	7,6	10,9
	2	91,8	5,2	12
	3	98,8	7,6	11,6
	среднее	96,5	6,8	11,5
II (20 / 80 %)	1	91,3	7,2	12
	2	98	6,4	11,6
	3	98,3	6,8	11,6
	среднее	95,8	6,8	11,7

Анализ полученных результатов, позволяет утверждать, что повторное использование сплава допустимо. Однако результаты механических испытаний свидетельствуют о незначительном снижении механических свойств получаемого сплава.

Такая тенденция может быть вызвана частичным выгоранием легирующих элементов, внесением в плавку нежелательных включений, которые при кристаллизации расплава выделяются на границах зерен и негативно влияют на пластичность и прочность получаемых образцов.

## ВЫВОДЫ

Разработка и внедрение технологии многократного использования технологического возврата в литейном производстве открывает большие возможности для изучения влияния технологических факторов на качество переплавляемых сплавов. Только четкий контроль параметров ведения процесса рафинирующей плавки и индивидуальный подход при исследовании каждого сплава обеспечат желаемый уровень чистоты сплава по включениям, благоприятную структуру, а значит и высокие физико-механические свойства отливок. Индивидуальный подход к каждому сплаву обусловлен сложной системой легирования сплава, а, как известно, каждый элемент или его отсутствие (в результате выгорания) играет свою роль в формировании структуры сплава. В общем, для жаростойких сплавов можно сказать, что, определяя оптимальные параметры температурно-временного воздействия на расплав, можно в значительной степени повышать качество расплава, улучшая его однородность и чистоту. Однородность и чистота расплава способствуют началу кристаллизации металла при большем его переохлаждении относительно линии ликвидус, измельчению структуры металла и снижению ликвационных процессов.

К температурно-временной обработки расплава легко адаптироваться в условиях литейного цеха и непосредственно к процессу вакуумно-индукционной плавки, не требуя дополнительных расходов, перенастройки оборудования и специального обучения персонала.

Проанализировав результаты проведенных экспериментов, можно сделать вывод, что повторное использование технологического возврата сплава ВЖЛ12Э-ВИ, как, в прочем, и всей номенклатуры применяемых в цехе сплавов, вполне допустимо. Однако требуется проведение комплекса дополнительных исследований по совершенствованию технологического процесса подготовки исходных шихтовых материалов, повышению уровня контроля параметров ведения плавки, применению передовых разработок и достижений в области техники.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Миллер Г. Е. Конструкция газовой турбины и суперсплавы / Г. Е. Миллер, У. Л. Чемберс // Сб. Суперсплавы II: жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Г. Е. Миллер; под ред. Симса Ч. Т., Столоффа Н. С., Хагеля У. К.; пер. с англ. кн. 1; под ред. Шалина Р. Е. – М. : Металлургия, 1995. – С. 49–84.
2. Погутов А. В. Опыт литья лопаток ГТД / А. В. Погутов, С. И. Яцык // *Авиационная промышленность*. – 1992. – № 5. – С. 56–63.
3. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) / Е. Н. Каблов. – М. : МИСИС, 2001. – С. 632–633.
4. Термовременная обработка расплава: основы – возможности – пути реализации в авиационной промышленности / Р. Е. Шалин, Б. А. Баум, Г. В. Тягунов, Е. Б. Качанов // Приложение к журналу «Авиационная промышленность». – М. : Машиностроение, 1989. – № 2. – С. 2–5.