



УДК 669.187.58.001.5

ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ СПОСОБАМИ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ

И. И. Максюта, Ю. Г. Квасницкая,
В. М. Симановский, Г. Ф. Мьяльница

Одновременно с системой усовершенствования внутризаводского учета, классификации и паспортизации отходов на примере предприятия НПКГ «Зоря»–«Машпроект» (г. Николаев) авторами предложена новая технология фильтрации и рафинирования расплава при вакуумном переплаве некондиционных отходов многокомпонентных никелевых сплавов в серийном плавильном агрегате ПМП-4М с целью получения вторичной шихтовой заготовки. Процесс предусматривает выдержку жидкого металла в специально сконструированной многоуровневой форме с керамическим фильтром. Это обеспечивает эффективную зонную очистку металла за счет отеснения примесей с фронта кристаллизации с последующим удалением проблемной зоны литой заготовки путем механической обработки. Проведенные организационно-технические мероприятия при опытно-промышленном опробовании предложенной технологии показали возможность повышения коэффициента использования литейных отходов при литье изделий от 30... 40 по массе шихты до 70... 80 % в зависимости от типа изделий.

Simultaneously with a system of improving the inplant accounting, classification and certification of waste on the example of enterprise «Zorya»–«Mashproekt» (Nikolaev city), the authors have suggested a new technology of filtering and refining of molten metal in vacuum remelting of off-grade waste of multi-component nickel alloys in the serial melting unit PMP-4M to produce a secondary charge billet. The process envisages the holding of molten metal in a specially-designed multi-level mould with a ceramic filter. This provides an effective zonal purification of metal due to forcing-out of impurities from the crystallization front with a subsequent removal of a problematic zone of a cast billet by mechanical treatment. The carried out organizational-technical measures at experimental-industrial testing of the suggested technology showed the feasibility of increasing the utilization factor of waste in casting of products from 30... 40 % by charge mass up to 70... 80 % depending on the type of products.

Ключевые слова: жаропрочные сплавы; литейные отходы; лопатки ГТД; вакуумно-индукционный переплав; электроно-лучевой переплав; модифицированная керамика

Введение. В технологическом цикле изготовления литых и деформированных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) применяют дорогостоящие жаропрочные сплавы на никелевой, кобальтовой и железной основах, производство которых отсутствует в Украине.

В то же время отечественная промышленность располагает крупными центрами изготовления стационарных (энергетических) и транспортных (авиация, судостроение) газовых турбин (ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект», г. Николаев, ОАО «МоторСич», ЗМКБ «Прогресс», г. Запорожье, «Турбоатом», г. Харьков), чем объясняется актуальность решения технологических задач по эффективному использованию первичных материалов и восстанов-

лению образующихся отходов. Выбор технологии передела литейных и механических отходов целиком зависит от их четкого предварительного ранжирования не только по маркам сплавов, количеству, но и по степени загрязненности инородными примесями (остатки формовочных и стержневых керамических масс, вредные примесные элементы, газы и т. п.).

В настоящей работе с целью повышения эффективности использования дорогостоящих отходов жаропрочных сплавов на никелевой и железной основах авторами проведен анализ внутризаводской учетной документации образования и динамики накопления литейных отходов различных видов продукции (сопловые и рабочие лопатки, стойки, обтекатели и др.) на примере ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект» и предложена усовершенствованная система классификации и паспортизации литейных

Таблица 1. Полный химический состав жаропрочных сплавов ЧС88У и IN 738 LC разных производителей, согласно действующим стандартам [1–3]

Элемент	CM88UVI «First Rixson»	ЧС88УВИ Россия, Ступино	IN 738 LC	Элемент	CM88UVI «First Rixson»	ЧС88УВИ Россия, Ступино	IN 738 LC
	Массовая доля элемента, %						
Ni	Основа	59,88	Основа	Ta	0	0,030	1,600
C	0,09	0,084	0,10	P	0,006	0,005	0,005
Cr	15,43	15,56	16,00	S	0,001	0,002	0,001
Co	10,97	8,59	8,30	Ga	< 0,002	0,001	–
Mo	2,13	0,76	1,70	In	0	1·10 ⁻⁵	–
Fe	0,08	0,49	0,13	Mg	< 0,005	0,002	< 0,005
Al	3,16	3,90	3,50	Ag	< 1·10 ⁻⁴	1·10 ⁻⁵	< 1·10 ⁻⁵
Ti	4,76	3,99	3,40	N	8·10 ⁻⁴	0,006	0,002
B	0,093	0,011	0,10	O	0,0015	0,0014	6·10 ⁻⁴
W	5,35	6,38	2,70	As	< 0,0015	3,8·10 ⁻⁴	–
Nb	0,26	0,29	0,90	Bi	< 5·10 ⁻⁴	6,27·10 ⁻⁴	< 1·10 ⁻⁵
Zr	0,04	0	0,40	Pb	< 5·10 ⁻⁵	7,5·10 ⁻⁴	< 3·10 ⁻⁵
Hf	0,50	0,029	–	Sb	< 2·10 ⁻⁴	1,4·10 ⁻⁴	–
Y	0,03	–	–	Se	< 1·10 ⁻⁴	3,7·10 ⁻⁵	–
Ce	0,015	–	–	Sn	< 0,002	0,0024	–
Cu	0,01	–	< 0,20	Te	< 5·10 ⁻⁵	0,0016	< 5·10 ⁻⁵
Si	0,03	0,07	< 0,10	Tl	< 2·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁶	Не определяются
Mn	0,01	0,06	< 0,20	Zn	< 4·10 ⁻⁴	6·10 ⁻⁵	»

Примечание. Массовая доля Hg, Ge, Au, K, Na, U, Th составляет ≤50 ppm.

отходов, образующихся при производстве деталей энергетических и транспортных ГТД.

Состояние вопроса, материалы и технологические процессы. Следует отметить, что в последние годы основным поставщиком коррозионно-стойких жаропрочных сплавов, используемых при изготовлении лопаток ГТД с ресурсом 5000... 10000 ч, для энергетики и газоперекачивающих электростанций является Челябинский металлургический комбинат; для судовых и энергетических турбин с большим ресурсом (до 100000 ч) — такие известные фирмы, как «INCO», «First Rixson» (обе Великобритания) и «Teledyne» (США). Так, начиная с 2000 г. фирма «First Rixson» поставляет на предприятие сплавы CM88UVI (российский аналог — сплав ЧС88УВИ), CM104VI (ЧС104ВИ), CM648VI (типа ВХ4Л) (табл. 1).

Примером эффективной реализации малоотходного производства на зарубежных предприятиях является технологическая цепочка, установленная между заводом-изготовителем сплавов (фирмой «First Rixson») и предприятием-изготовителем ГТД («Howmet», Великобритания). Так, для выплавки вторичной шихтовой заготовки фирма «First Rixson» использует от 10 до 50 % отходов производства фирмы «Howmet» (литейных и механических), предварительно рассортированных по плавкам и прошедших очистку от керамики. Такая сортировка отходов обеспечивает вторичной шихтовой заготовке соответствие химического состава, включая примеси, стандарту [1] на жаропрочные сплавы типа IN 738.

В отечественной практике тщательно контролируемую систему возвращения отходов литейного производства для изготовления шихтовой заготовки удалось применить только для некоторых особо дорогостоящих ренийсодержащих сплавов (типа ЖС32) на ЗМКБ «Прогресс» (г. Запорожье).

Для остальных украинских предприятий отрасли экономически нецелесообразно возвращать отходы на зарубежные металлургические предприятия-изготовители сплавов. А внутризаводская технология использования собственных отходов литейного производства до настоящего времени предусматривает добавление к первичной заготовке только 30... 50 мас. % кондиционных отходов при выплавке изделий способом вакуумно-индукционного переплава.

Такой способ переплава не может обеспечивать эффективное рафинирование расплава от примесей, включая тугоплавкую керамику, щелочные металлы, газы и т. п. При указанной схеме производственного цикла для повышения коэффициента использования отходов необходима разработка как эффективной рафинирующей технологии внутризаводского процесса регенерации отходов, так и рациональной системы классификации и паспортизации отходов для каждого предприятия в соответствии с видами продукции.

Анализ технических условий зарубежных фирм на жаропрочные сплавы [1, 2] относительно допустимого количества примесных элементов, в том числе цветных металлов (свинец, висмут, теллур, галлий, селен, кремний и другие, суммарно до 0,05 мас. %), свидетельствует о необходимости их

Таблица 2. Структура расхода сплавов при изготовлении лопаток ГТД, %*

Марка сплава	Выход годового, %	Некондиционные отходы		Кондиционные отходы		Отходы при механической обработке	Угар и безвозвратные потери	Суммарное количество отходов
		По лопаткам	Литейные чаши	По лопаткам	Литники, питатели			
ЧС70	34	8,2	20,3	9,3	17,1	8	3,1	66
ЧС88У	32	9,6	19,4	12,6	13,2	10	3,2	68
ЧС91	43	6,6	20,8	7,3	10,0	9	3,3	57
ЧС104	32	8,1	20,8	9,2	16,7	10	3,2	68
ЭК9	37	7,2	20,0	8,5	16,3	8	3,0	63
ЭП648	42	5,3	20,5	6,1	12,9	10	3,2	58
Среднее значение	37	7,4	20,3	8,7	14,3	9,1	3,2	63

* За 100 % принято количество загружаемой шихты.

строгого контроля в литом изделии. К сожалению, отечественные стандарты не предъявляют таких строгих требований к первичным заготовкам сплавов.

Согласно существующим стандартам, суммарное количество примесей, внесенных с исходными шихтовыми материалами, может составлять более 1 % массы сплава. Кроме того, в процессе непосредственной выплавки изделий ощутимым источником загрязнения могут служить неметаллические включения, попадающие из футеровки плавильного тигля, представляющего собой плавильный магнетит (выплавка шихтовой заготовки) и муллито-корундовые тигли (выплавка изделий) [4]. В связи с этим важнейшее значение приобретают разработка и использование в производственном цикле новых термостабильных и термостойких керамических материалов) [4].

Как показывает проведенный на предприятиях отрасли анализ, количество образующихся кондиционных отходов при выплавке изделий рассматриваемого сортамента в среднем составляет 23 % общей массы расходуемой шихты (табл. 2). Некондиционные отходы, к которым относятся литейные чаши с остатками керамической сетки для фильтрации металла и лопатки, отбракованные при ЛЮММА-контроле за счет дефектов внутренних полостей, составляют в среднем 28 % массы расходуемой шихты независимо от марки сплава. Таким образом, результаты статистического анализа показали, что суммарное количество образующихся отходов при выплавке лопаток ГТД в среднем составляет 60...70 % массы загружаемой шихты, из них до настоящего времени допустимо было из-за отсутствия системного учета отходов и эффективного процесса регенерации использовать повторно не более 30...40 %.

Для экономически обоснованного решения проблем по полноценному восстановлению кондиционных и некондиционных отходов жаропрочных сплавов, отбракованных в том числе и по химическому составу, авторы предлагают технологию двухстадийного переплава жаропрочных сплавов с включением в технологическую цепочку разработанного

на ПП НПКГ «Зоря-Машпроект» совместно со ФТИМС НАНУ так называемого способа направленного зонного переплава [5].

В качестве литейного агрегата применяли горизонтальную вакуумную печь сопротивления ПМП-4М. Для обеспечения первичной механической фильтрации расплава от крупных неметаллических включений использовали стандартный керамический фильтр марки К657-2783ЧИ, вставленный в верхнюю часть специально разработанной многоуровневой корундовой формы, позволяющей непосредственно в ней проводить фильтрацию.

Рафинирование расплава от неметаллических включений происходит за счет наличия в горизонтальной печи трех термических зон (нагрев, плавление и кристаллизация). Скорость кристаллизации при стационарном режиме регулируется скоростью передвижения форм с расплавленным металлом вдоль печи из одной зоны в другую. В соответствии с термодинамическими характеристиками сплавов, температура расплава поддерживается на уровне, не превышающем 1460 °С. Термический градиент на фронте роста зерен составляет 15...20 °С/см, что способствует отторжению примесных элементов на границу фронта кристаллизации и в дальнейшем позволяет удалять их путем механической обработки заготовки.

В процессе кристаллизации расплава в заданных термовременных параметрах практически не зафиксировано выделение в межзеренном пространстве глыбообразных карбидных фаз, являющихся концентраторами напряжений и стимулирующих зарождение микротрещин.

При сохранении эффекта рафинирования расплава от газов и неметаллических включений в процессе кристаллизации и после затвердевания заготовки важным является правильный выбор огнеупорных материалов и технологии получения тиглей, фильтров и литейных форм. Критерием работоспособности огнеупорных материалов прежде всего служит степень контактного взаимодействия между огнеупором и расплавом.

Проведена серия экспериментов по исследованию межфазного взаимодействия таких материалов, как кварц, дистенсилиманит, корунд, циркон, алюмомагнезиальная шпинель с расплавами жаропрочных сплавов марок ЧС70, ЧС88У и ЧС104. Опытные плавки проводили в промышленной вакуумно-индукционной печи УППФ-2 по регламентированному на предприятиях-производителях лопаток ГТД для каждой марки сплавов технологическому режиму (давление в печи 1,2... 2,5 Па, температура заливки в формы 1560... 1580 °С, температура формы 800 °С). Основным параметром, характеризующим степень взаимодействия, выбрана глубина зоны измененного слоя отливки (так называемая зона контакта), измеряемая при помощи металлографического микроскопа. Структурно-химические особенности зоны контакта изучали методами микрорентгеноспектрального анализа, оже-спектроскопии, оптической металлографии, также измеряли микротвердость отливки вдоль поперечного разреза образцов. Исследования показали, что глубина зоны составляла от 0,5... 5,0 при взаимодействии с алюмомагнезиальной шпинелью до 150... 200 мкм для кварца и убывала в ряду кварц-дистенсилиманит-циркон-корунд-алюмомагнезиальная шпинель.

При анализе структурных изменений контактной зоны обнаружено отсутствие в ней выделений карбидов, что свидетельствует об обеднении углеродом зоны взаимодействия. В ходе микрорентгеноспектрального анализа в приповерхностной зоне зафиксировано снижение содержания таких элементов, как алюминий, титан, хром. Вероятно, механизм взаимодействия сплава с формой обусловлен окислением компонентов сплава (углерода, алюминия и титана кислородом), выделившихся при диссоциации SiO_2 из формы, и перераспределением этих элементов в приповерхностной зоне отливок.

На основе полученных результатов с учетом использования в качестве связующих при изготовлении форм для получения лопаток ГТД преимущественно гидролизованного этилсиликата или си-

ликогелей (источники слабоструктурированного аморфного SiO_2) нами разработан способ связывания SiO_2 в более термостабильные соединения [6].

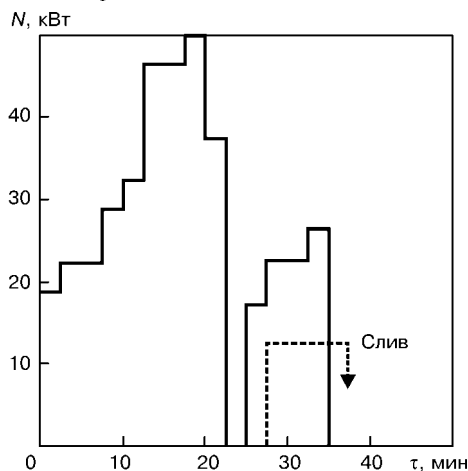
Авторами экспериментально показано, что для связывания SiO_2 эффективным модификатором может служить тонкодисперсный порошок металлического алюминия. Это позволяет при термообработке форм перевести SiO_2 в алюмосиликат-муллит. Так, глубина измененного слоя отливки, залитой в корундовую форму со связующим этилсиликатом, содержащим 14... 16 % SiO_2 , составила 30... 40 мкм, в отличие от таковой, залитой в модифицированную форму (20... 25 мкм).

Испытания образцов на кратковременную и длительную прочность показали, что температура ниже 800 °С и глубина контактной зоны в пределах 40 мкм не оказывают существенного влияния на значения механических характеристик, однако остаточная прочность образцов, залитых в формы из различных материалов, имеет явную зависимость от глубины зоны контакта. Так, предел выносливости на базе $2 \cdot 10^7$ циклов при температуре 800 °С сплава ЧС70 составил для образцов, залитых в форму без модификатора, 400... 420 МПа, а с применением модификатора — 430... 440 МПа. Аналогичная тенденция зафиксирована при испытаниях образцов из сплавов ЧС88У [7].

На основе результатов проведенных исследований по выбору огнеупорных материалов для изготовления фильтров и тиглей рекомендовано использование корунда и алюмомагнезиальной шпинели. В условиях производства отработан технологический процесс изготовления оболочковых форм из модифицированной керамики.

Для повышения степени очистки вторичной шихтовой заготовки при изготовлении наиболее ответственных деталей ГТД (рабочие лопатки первой и второй ступеней) рекомендовано проводить после зонной очистки вторую стадию рафинирующего переплава полученной заготовки разработанным во ФТИМС НАНУ способом совмещенной плавки [8], который предусматривает переплав отходов в вакуумно-индукционной установке, смонтированной на базе серийной промышленной печи УППФ-3М.

Плавка шихты и перегрев расплава производятся в керамическом тигле путем индукционного нагрева, а рафинирование и термовременная обработка — за счет дополнительного электронно-лучевого обогрева расплава с помощью установленной электронно-лучевой пушки [9]. Технологические режимы переплава варьируются в зависимости от соотношения кондиционных и некондиционных отходов, применяемых при изготовлении вторичной заготовки. При проведении плавки (рисунок) с целью сокращения времени оплавления негабаритной кусковой шихты мощность вакуумно-индукционного индуктора поднимали до максимума (50 кВт). После наведения жидкометаллической ванны для удаления шлака с поверхности и интенсификации процесса рафинирования расплава дополнительно к



Режимы проведения плавки сплава ЧС88У; сплошной линией обозначен вакуумно-индукционный нагрев; штриховой — электронно-лучевой; N — мощность; τ — время плавки



вакуумно-индукционному нагреву включали электронно-лучевую пушку и прогревали ванну лучом для более полного испарения шлака с поверхности. Интегральная температура ванны после этих манипуляций составляла 1600... 1700 °С.

Эффективность нового способа была проверена при рафинировании кондиционных отходов жаропрочных коррозионно-стойких сплавов, используемых для изготовления лопаток авиационных, судовых и стационарных двигателей [10, 11]. Установлено, что совмещенная плавка обеспечивает эффективное снижение в сплавах газов, примесных элементов и неметаллических включений для всех исследованных типов сплавов, а также способствует измельчению структуры и очищению границ зерен в сравнении с отливками, полученными по стандартной технологии.

Так, сера и фосфор относятся к наиболее вредным примесям, образующим легкоплавкие эвтектики из сульфидов и фосфатов некоторых металлов, поэтому их содержание в сплавах строго ограничивается в соответствии с действующими стандартами концентрацией 0,01... 0,001 %. Важно подчеркнуть, что для сплава ЧС88У при соотношении кондиционных и некондиционных отходов в шихте 1:1 после двухстадийного переплава по приведенному режиму зафиксирована тенденция к снижению содержания фосфора в сплаве (от 0,005 в первичной шихтовой заготовке до 0,0037 % во вторичной), а количество серы не превышает заданного стандартом уровня.

Что касается выхода годного металла, который оценивали отношением массы металла в заготовках к массе загрузки отходов, то при рафинировании кондиционных отходов способом ВИП+ЭЛП он составляет 98, а некондиционных в смеси с кондиционными — 89,5 %. При переплаве некондиционных отходов способом направленного зонного переплава выход годного также составляет 89,5 %. Хотя переплав некондиционных отходов сопровождается значительно большими безвозвратными потерями металла, по сравнению с кондиционными, использование разработанной технологии является эффективным, поскольку позволяет вернуть в производство около 90 % отходов.

Выводы

1. Проведен анализ внутризаводской учетной документации образования и динамики накопления литейных отходов при производстве литых деталей ГТД (сопловые и рабочие лопатки, стойки, обтекатели и др. на базе предприятия ГП НПКГ «Зоря» — «Машпроект»). Согласно полученным данным образования кондиционных и некондиционных отходов (количество, степень загрязненности), составлены нормы соотношения их при переплаве во вторичную шихтовую заготовку, даны рекомендации допустимого содержания типов отходов соответс-

твенно каждой марке сплавов с учетом ответственности изготавливаемой детали.

2. Показано, что существенное повышение (до 90 % по массе шихты) коэффициента использования некондиционных отходов достигнуто путем разработки и опробования технологии зонного переплава отходов жаропрочных сплавов в горизонтальном плавильном агрегате ПМП-4 с использованием оригинальной конструкции многоуровневой керамической формы, позволяющей проводить первичное механическое рафинирование расплава за счет вставного керамического фильтра. Термический градиент на фронте роста зерен, составляющий 15... 20 °С/см, способствует отторжению примесных элементов на границу фронта кристаллизации и в дальнейшем позволяет удалять их путем механической обработки заготовки.

3. Исследования показали, что главной причиной взаимодействия расплава с материалом формы является SiO₂ связующего — гидролизованного этилсиликата. Для устранения этого явления разработана технология связывания SiO₂ (муллита), который является термохимически стабильным материалом и не взаимодействует с расплавом.

1. *Standard AMS 2280A. Trace elements control. Nickel alloys castings.* — Issued 01.07.1992
2. *Инструкция И ЖАКИ. 105.015-89: Система качества. Отливки из жаропрочных сплавов вакуумной заливки. Технические требования. Правила приемки и методы контроля.* — Введ. на НПП «Машпроект» в 1989 г. — Николаев, 2001. — 90 с.
3. *105.509-2001. Инструкция М ЖАКИ. Сплавы жаропрочные литейные для лопаток газовых турбин (Паспорт сплава ЧС88УВИ).* — Введ. на НПП «Машпроект» в 2001 г. — Николаев, 2001. — 16 с.
4. *Степанов В. М., Шаев О. В., Трефилов А. Ф.* Исследование возможности применения муллито-карбокородовых тиглей для литья лопаток ГТД на печах УППФ // *Авиационные материалы. Прогрессивные процессы литья охлаждаемых лопаток.* — М.: ОНТИ ВИАМ, 1981. — Вып. 6. — С. 16-19.
5. *Добкина Ю. Г.* Специальная конструкция многоуровневой формы с фильтрацией расплава для утилизации суперсплавов // *Процессы литья.* — 2001. — № 1. — С. 68-74.
6. *Симановский В. М.* Теоретические основы получения литейных форм и стержней на основе модифицированной керамики // *Там же.* — 2001. — № 2. — С. 41-47.
7. *Симановский В. М.* Исследование взаимодействия контактной зоны металл-форма для жаропрочных сплавов // *Там же.* — 2000. — № 3. — С. 83-85.
8. *Myalnitsa H., Dobkyna Yu.* Thermal stability of superalloys structure after cast waste recovery // *Proc. 6th World Congr. on R'2002 (Recovery, Recycling, Reintegration).* — Geneva (Switzerland), 2002. — P. 5.
9. *Установка для совмещенной индукционной и электронно-лучевой плавки металлов и сплавов* / Ю. Ф. Аникин, А. Д. Жежера, С. В. Ладохин, Т. В. Лапшук // *Металл и литье Украины.* — 1998. — № 5-6. — С. 8-10.
10. *Производство высокотемпературных литых лопаток авиационных ГТД* / Под ред. С. И. Яцыка. — М.: Машиностроение, 1995. — 256 с.
11. *Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей* / Под ред. А. Г. Братухина, Г. К. Язова, Б. Е. Карасева. — М.: Машиностроение, 1997. — 416 с.

Физико-технолог. ин-т металлов и сплавов

НАН Украины, Киев

НПКГ «Зоря» — «Машпроект», Николаев

Поступила 04.10.2006