



УДК 669.187.56

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ ОТХОДОВ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Е. Н. Еремин

Рассмотрены особенности электрошлакового переплава отходов жаропрочных сплавов. Для повышения качества слитков предложено использовать комплексное модифицирование переплавляемого металла. Приведены результаты механических и металлографических исследований литого металла. Показаны преимущества новой технологии и возможность регенерации отходов в мерные шихтовые заготовки.

Specifics of electroslag remelting of heat-resistant alloy waste are considered. To improve the quality of ingots, the integrated modifying of metal being remelted is suggested. Results of mechanical and metallographic examinations of cast metal are given. The advantages of the new technology and feasibility of regeneration of waste into charge billets are shown.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; отходы жаропрочных сплавов; слитки; модифицирование; механические свойства; жаропрочность; структура

Жаропрочные никелевые сплавы широко используются для изготовления деталей ответственного назначения в авиационном двигателестроении. К ним предъявляются высокие требования по точности размеров, чистоте поверхности и особенно качеству литого металла. Поэтому основным технологическим процессом изготовления таких деталей является литье по выплавляемым моделям в горячие керамические формы в вакуумных индукционных печах. Но и в этом случае фиксируется значительный процент брака, низкий выход годной продукции, что обуславливает малый коэффициент использования металла.

Забракованные отливки и различные элементы литниково-питающей системы в дальнейшем не используются и фактически являются безвозвратными потерями дорогостоящих и дефицитных сплавов. Поэтому максимальное использование отходов никелевых сплавов, образующихся как на стадии металлургического передела, так и при последующей обработке, перспективно и экономически выгодно.

В то же время вторичное использование забракованных отливок ограничивается рядом причин. Во-первых, из-за их негабаритности и сложности конструкции невозможно производить загрузку тигля вакуумной индукционной печи шихтой требуемой массы. Кроме того, организация производства мерной заготовки в вакууме на моторостроительных заводах вообще неэкономична. Во-вторых, при других способах литья жаропрочные сплавы в резуль-

тате переплавов загрязняются, что снижает механические и служебные характеристики литого металла.

Решением данной проблемы является организация регенерации отходов никелевых сплавов без применения вакуумно-индукционного литья (ВИЛ) с одновременным получением мерной шихтовой заготовки нужного размера, которую можно было бы использовать в дальнейших переделах. Перспективным в этом отношении является электрошлаковый переплав (ЭШП).

Процесс ЭШП наряду с простотой и высокой производительностью обеспечивает и высокое качество литого металла [1]. Вместе с тем, традиционный ЭШП жаропрочных сплавов имеет свои трудности [2, 3], связанные прежде всего с необходимостью обеспечения в литом металле строго заданного химического состава. Во-первых, не происходит полного усвоения легкоокисляющихся элементов (титана и алюминия), образующих γ' -фазу и определяющих основные свойства сплава. Во-вторых, электрошлаковый металл имеет столбчатую крупнозернистую структуру с большой протяженностью первичных осей дендритов, что в совокупности с другими факторами не способствует в полной мере получению требуемых механических свойств и служебных характеристик слитков. В связи с этим совершенствование технологии ЭШП жаропрочных никелевых сплавов является актуальной задачей.

Одним из способов повышения качества литого металла является применение модифицирования [4–6], осуществляемого обычно путем введения в металлический расплав частиц тугоплавких, слабо-растворимых соединений-инициаторов, являю-



Таблица 1. Химический состав сплава ЖС6У

Объект исследования	Массовая доля элементов, %									
	C	Cr	Co	W	Mo	Ti	Nb	Al	S	P
Серийный сплав, № 917	0,19	9,0	10,1	10,1	1,7	2,6	1,1	5,7	0,005	0,006
Отходы ВИЛ	0,19	8,4	9,8	10,0	1,7	2,5	1,0	5,5	0,005	0,006
Слитки, полученные способом ЭШП из отходов, немодифицированные	0,18	8,3	9,4	9,8	1,6	2,0	0,96	5,1	0,002	0,004
То же, модифицированные	0,19	8,3	9,5	9,8	1,6	2,5	0,98	5,4	0,002	0,004
Металл ВИЛ из модифицированных слитков ЭШП	0,18	8,2	9,5	9,8	1,6	2,4	0,97	5,3	0,002	0,004
Технические условия	0,13...0,20	8,0...9,5	9,0...10,5	9,5...11,0	1,2...2,4	2,0...2,9	0,8...1,2	5,1...6,0	≤ 0,010	≤ 0,015

щихся готовыми центрами кристаллизации. В то же время при этом возникает ряд проблем, связанных с низкой зародышеобразующей активностью частиц, обусловленной тем, что поверхность частиц порошков большинства тугоплавких веществ, пригодных для модифицирования, не характеризуется необходимыми адсорбционными свойствами по отношению к модифицируемому расплаву. Поэтому необходимо производить активирование частиц тугоплавких инокуляторов, в частности путем ввода в расплав некоторых растворимых поверхностно-активных элементов, способствующих образованию новой фазы — переходного слоя на инокуляторах. Вследствие этого зародышеобразующая активность инокулятора по отношению к расплаву повышается. Наряду с тугоплавкими нерастворимыми частицами предложено вводить растворимые добавки, снижающие уровень межфазной энергии, т. е. осуществлять комплексное модифицирование.

В результате проведенных исследований установлено, что выбор инокуляторов необходимо производить исходя из условий их устойчивости против растворения в данном расплаве, высокой электропроводности и близости значений плотности [7]. При этом лучше использовать синтетические ультрадисперсные порошки (УДП) с наночастицами размером 0,01... 0,5 мкм, поскольку в этом случае состав и количество дисперсной фазы, вводимой в металл, могут быть заданы заранее, что служит предпосылкой получения стабильных результатов. Выбор активирующих добавок следует осуществлять из условий их сродства к веществу данного инокулятора и способности сглаживать различия между частицей и расплавом на границе их раздела. Исходя из этого разработан модификатор, в состав которого входят УДП карбонитрида титана, титан и иттрий.

Эффективность действия данного модификатора исследована при электрошлаковом переплаве отходов сплава ЖС6У — представителя семейства высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов, широко используемого для изготовления деталей авиационной техники.

Переплав осуществляли в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе, обеспечивающем стерильные условия плавки на установке А-550У с источником питания ТШС-3000-1. Расходуемый элект-

род собирали из стояков литниковой системы и забракованных отливок, сваренных в плеть. Плавку в кристаллизаторе начинали с жидкого старта. В качестве рабочего шлака использовали высокофтористый флюс АНФ-1П, наиболее широко применяемый при электрошлаковой плавке высоколегированных сталей и сплавов.

Модифицирование осуществляли путем переплава трубчатого электрода-спутника из никелевого сплава, внутреннюю полость которого набивали порошкообразными компонентами. В результате переплава получали мерную заготовку диаметром 60 мм и длиной 250 мм, из которой после очистки от гарнисажа и удаления донной и головной частей изготовляли образцы для испытаний и металлографических исследований. Часть слитков расплавляли в вакуумно-индукционной печи, где по серийной технологии отливали образцы для сравнительных исследований химического состава и качества металла.

Сплав ЖС6У относится к группе литейных сложнолегированных многокомпонентных жаропрочных сплавов, в структуре которых наряду со значительным размером макрозерна и большой разноточностью кристаллов при кристаллизации образуются различные фазы: твердые растворы, эвтектические системы, карбиды, интерметаллические соединения. Основной упрочняющей фазой является γ' -фаза, представляющая собой интерметаллид $(Ni, Co)_3(Al, Ti)$. Поэтому свойства литого сплава в первую очередь определяются его химическим и фазовым составом.

Выполненный химический анализ (табл. 1) свидетельствует о том, что состав немодифицированного никелевого сплава по большинству основных легирующих элементов в результате переплава под флюсом АНФ-1П изменяется незначительно. Исключение составляют титан и алюминий, концентрация которых находится на нижнем пределе требований технических условий.

В то же время механические свойства и длительная прочность слитков, химический состав которых соответствует марочному, не удовлетворяют техническим условиям. Сравнительные свойства слитков, полученных по указанным технологиям переплава, представлены в табл. 2.



Таблица 2. Свойства сплава ЖС6У

Объект исследования	Механические свойства			Жаропрочность
	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	σ_{240}^{975} , Ч
Отходы ВИЛ	945... 1018 981	4,9... 5,7 5,4	6,1... 6,6 6,3	52... 64 59
Слитки, полученные способом ЭШП из отходов, немодифицированные	921... 978 968	2,5... 3,2 2,9	2,9... 3,4 3,2	16... 25 21
То же, модифицированные	1017... 1036 1028	8,7... 9,8 9,3	6,8... 7,7 7,2	84... 98 92
Металл ВИЛ из модифицированных слитков ЭШП	1006... 1028 1019	8,1... 9,2 8,5	6,4... 6,9 6,6	67... 82 76
Технические условия	> 850	> 3,0	—	> 25

Примечание. В числителе приведен разбег данных, в знаменателе — их среднее значение.

Важными факторами, определяющими качество и служебные свойства жаропрочных сплавов, являются фазовый состав, состояние границ зерен, их размер, степень однородности, морфология и топография включений [8, 9].

Результаты исследования литого немодифицированного металла (как электрошлакового, так и отходов) показали, что макроструктура у него транскристаллическая, состоящая из крупных столбчатых кристаллов по периферии протяженностью до 30 мм (рис. 1).

Согласно результатам микроструктурного исследования, основными фазами в структуре сплава являются карбиды и γ' -фаза. Включения карбидов в виде каркасов сплошной скелетообразной формы, называемых китайским шрифтом, располагаются преимущественно по границам зерен и имеют очень большую протяженность. Карбиды подобной морфологии оказывают отрицательное влияние на свойства никелевых сплавов [4, 5, 9].

Введение в металл при переплаве 0,5 % модификатора приводит к существенному изменению как структуры, так морфологии и топографии карбидной фазы (рис. 2).

При этом происходит резкое измельчение макрозерна, устраняется столбчатость зерен и разнотерность. Дендритная структура литого металла — тонкая и однородная по сечению слитка. Карбиды приобретают компактную равноосную форму и равномерно распределены по объему зерна. Образование большого количества компактных карбидов можно объяснить увеличением степени переохлаждения расплава при введении в него модификатора, дисперсные частицы которого, являясь центрами кристаллизации, увеличивают скорость охлаждения металла. Такие морфо-

логия и топография карбидной фазы повышают химическую стабильность γ -матрицы благодаря связыванию легирующих элементов, взаимодействующих с углеродом, и оказывают благоприятное воздействие на длительную прочность сплава.

Анализ макрошлифов образцов после испытаний на жаропрочность показал, что во всех случаях разрушение имеет межзеренный характер. В образцах из немодифицированного металла разрушение происходит в зоне направленной кристаллизации по границам дендритов. Жаропрочность таких образцов составляет всего 16... 25 ч. В модифицированных образцах, показавших наибольшую жаропрочность (84... 98 ч), структура была очень дисперсной.

Вместе с тем нельзя объяснить повышение жаропрочности сплава при модифицировании только изменением структуры карбидной фазы и измельчением зерна при кристаллизации. На свойства никелевых сплавов большое влияние оказывает дисперсионное упрочнение матрицы за счет выделения γ' -фазы кубической морфологии, имеющей близкие с γ -фазой значения параметра кристаллической решетки, что обуславливает их когерентную связь [9]. Параметры образований γ' -фазы и их объемная доля определяют прочностные характеристики, а также сопротивление ползучести объема зерен, в то время как карбидные и боридные выделения — прочность границ зерен [10].

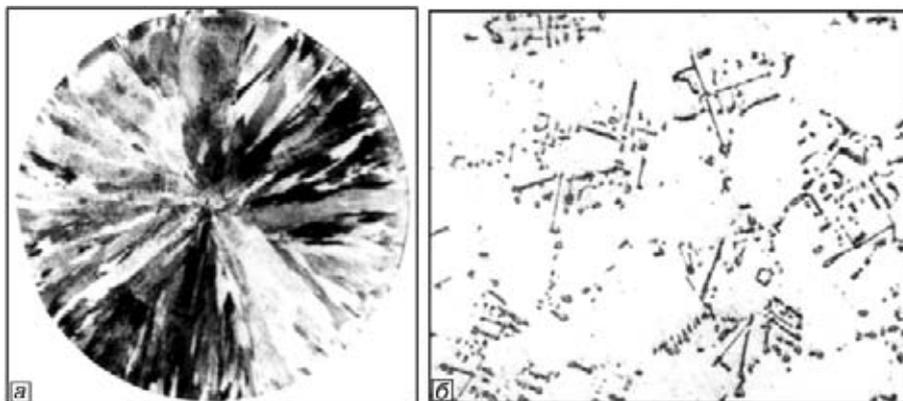


Рис. 1. Структура литого немодифицированного металла сплава ЖС6У электрошлаковой плавки: а — макроструктура; б — карбидная фаза (X 140)

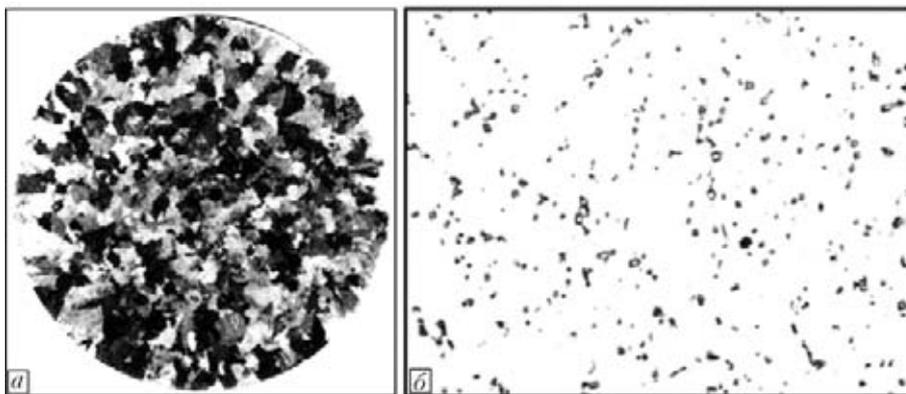


Рис. 2. Структура литого модифицированного металла сплава ЖС6У электрошлаковой плавки: *a* — макроструктура; *б* — карбидная фаза (X 200)

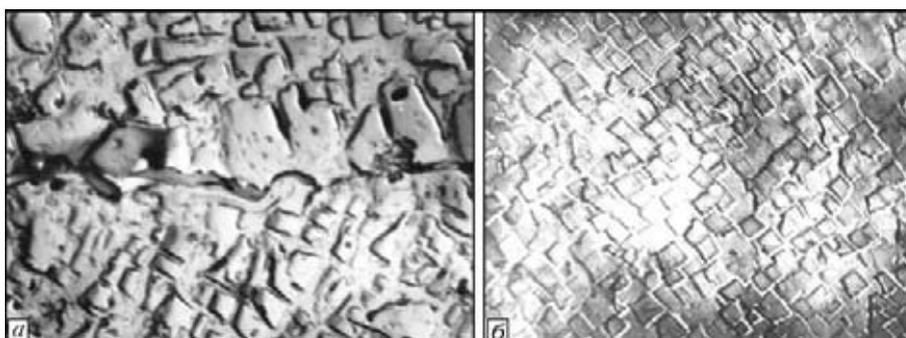


Рис. 3. Упрочняющая γ' -фаза в сплаве ЖС6У: *a* — немодифицированном (X 10000); *б* — модифицированном (X 10000)

Электронно-микроскопические исследования показали большую неоднородность дисперсности и морфологии частиц γ' -фазы в масштабах дендритной ячейки литого немодифицированного сплава ЖС6У (рис. 3).

В осях дендритов выделяются мелкие и неоднородные по форме частицы, а в межосных пространствах — значительно грубее, неправильной морфологии. Наряду с мелкими частицами (0,8 мкм) γ' -фазы зафиксированы крупные, скоагулированные выделения (свыше 4 мкм), по границам которых возникают и распространяются микротрещины. Подобная разнородность является следствием двух факторов. Во-первых, температура распада твердого раствора, локализованного в осях дендритов, ниже по сравнению с таковой в межосном пространстве, что связано с обеднением данных участков алюминием, титаном и ниобием из-за ликвационной неоднородности. Во-вторых, обогащение твердого

раствора в осях дендритов вольфрамом существенно тормозит протекание диффузионных процессов.

Количество и морфология γ' -фазы в модифицированном сплаве значительно отличаются от таковых в немодифицированном. Модифицирование формирует более дискретные мелкодисперсные выделения γ' -фазы преимущественно квадратной либо прямоугольной формы (рис. 3, б). При введении 0,01 % карбонитрида титана размер выделений γ' -фазы составляет 0,8...1,2 мкм, при 0,02 % тугоплавких частиц — 0,4...0,6 мкм. В случае дальнейшего увеличения концентрации тугоплавких частиц γ' -фаза достигает размеров 0,2...0,3 мкм с большой плотностью упаковки в матрице. Выделения γ' -фазы выравниваются по размерам, их форма после длительных испытаний не изменяется. Располагаются они вдоль кристаллографических плоскостей с очень малым расстоянием между ними.

Таким образом, структура модифицированного сплава состоит из двух когерентно связанных фаз: γ -твердого раствора и дисперсной γ' -фазы кубической формы, однородных по составу, размерам и морфологии как в осях, так и в межосных пространствах.

В целом свойства данного металла такие же, как у серийного сплава металлургического комбината. При этом (по сравнению с металлом ВИЛ) относительное удлинение увеличивается в 1,7 раза ($\delta = 9,3\%$), а время до разрушения — более чем в 1,5 раза (92 ч).

Последующий вакуумный переплав модифицированных слитков ЭШП не улучшает, а даже несколько ухудшает все свойства сплава, показатели которых все-таки остаются значительно выше требуемых техническими условиями. Изучение струк-

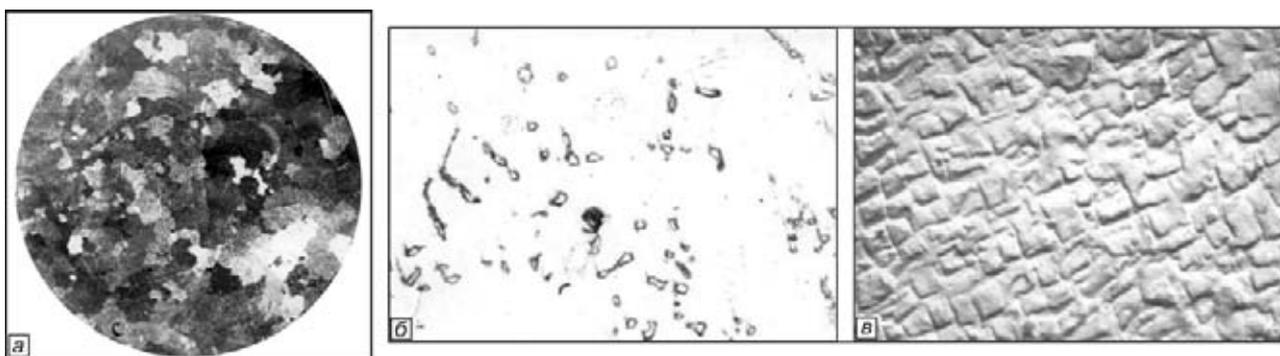


Рис. 4. Структура литого модифицированного металла сплава ЖС6У после ВИЛ слитков ЭШП: *a* — макроструктура; *б* — карбидная фаза (X 200); *в* — γ' -фаза (X 10000)



туры такого металла показывает, что эффект модифицирования сохраняется, но выражается несколько слабее (рис. 4). Столбчатость зерен отсутствует, хотя некоторая разнородность имеется, размер макрозерна при этом несколько увеличивается. Карбиды здесь более крупные, скоагулированы и имеют близкую к глобулям форму. Появляется некоторая неоднородность в строении γ' -фазы, а ее когерентность с матрицей уменьшается.

Таким образом, исследования показали, что применение модифицирования при ЭШП обеспечивает получение из отходов жаропрочных сплавов слитков с высоким металлургическим качеством литого металла, что позволяет использовать их как мерные шихтовые заготовки при ВИЛ деталей газотурбинных двигателей.

1. *Электрошлаковый металл* / Б. И. Медовар, Л. М. Ступак, Г. А. Бойко и др. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.
2. *Электрошлаковая плавка жаропрочного никелевого сплава ХН7ЗМБТЮ* / М. И. Кличевец, А. В. Шелгаева, Г. Г. Ведерников и др. // Спец. электрометаллургия. — 1980. — Вып. 41. — С. 60–68.
3. *Структура, фазовый состав и свойства сплава ЭИ437Б электрошлаковой разливки* / Ю. В. Латаш, М. М. Клюев, Г. П. Негода и др. // Там же. — 1984. — Вып. 55. — С. 7–11.
4. *Объемное модифицирование никелевых сплавов при изготовлении отливок* / В. Н. Чеченцев, В. П. Сабуров, Е. В. Замешаев, А. М. Микитась // Литейн. пр-во. — 1988. — № 9. — С. 13–14.
5. *Влияние микролегирования сплава ЖС6У иттрием на его фазовую стабильность* / В. В. Сидоров, Г. И. Морозова, А. М. Кулебякина, А. И. Гневшена // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 1988. — № 12. — С. 21–23.
6. *Фаткуллин О. Х., Офицеров А. А.* Модифицирование жаропрочных никелевых сплавов дисперсными частицами тугоплавких соединений // Литейн. пр-во. — 1993. — № 4. — С. 13–14.
7. *Еремин Е. Н.* Закономерности комплексного модифицирования литого электрошлакового металла // Анализ и синтез механических систем. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 1998. — С. 131–134.
8. *Химушин Ф. Ф.* Жаропрочные стали и сплавы. — М.: Металлургия, 1969. — 752 с.
9. *Прогнозирование влияния структурных факторов на механические свойства жаропрочных сплавов* / А. В. Логунов, П. В. Петрушин, Е. А. Кукшова, Ю. М. Должанский // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 1987. — № 6. — С. 16–20.
10. *Оптимизация результатов термической обработки деформированных полуфабрикатов из среднелегированных жаропрочных никелевых сплавов* / О. Н. Власова, Н. Н. Корнеева, В. И. Еременко и др. // Там же. — 1993. — № 1. — С. 31–34.

Омский государственный технический ун-т
Поступила 09.02.2005



РЫНОК МЕТИЗОВ СНГ-2005

I-я Международная конференция

29 июня – 1 июля 2005 г.
г. Ялта, АР Крым, Украина

Организаторы

Центр Держззовнишинформ и объединение «Укрметиз»

Цель проведения

Конференция проводится с целью анализа и обобщения опыта производства и торговли метизами, а также прогнозирования конъюнктуры рынка метизов на ближайшую перспективу. Предусматривается обсуждение проблем реализации инноваций в рамках малого, среднего и крупного бизнеса. Кроме того, Вам предоставляется прекрасная возможность совместить деловую поездку с гостеприимной атмосферой крымского курорта.

Тематика конференции

- ⇒ новое в производстве метизов (сертификация продукции, гармонизация нормативной базы, технологии, оборудование, защитные покрытия, новая продукция);
- ⇒ сырьевые материалы для производства метизов (качество, объемы, цены);
- ⇒ торговля метизами (внутренний и внешний рынки, прогноз конъюнктуры, торговые ограничения, конкуренция, потребление, ценовая политика);
- ⇒ инновации и управление метизным бизнесом (консолидация, импортозамещение, государство и инновации, проблемы кредитования, экспертиза инноваций);
- ⇒ презентации фирмами оборудования и технологий для производства метизов.

Контактное лицо: Гнатуш Виталий Апполонович

Тел. 38(044) 246-41-09; 246-43-67; 482-05-56

Факс: 246-41-09; 246-43-67; 482-05-56

E-mail: gnat@dze.mfert.gov.ua; www.eximbase.com

ул. Воровского 22, г. Киев, ГСП-601, 01601,

Украина ООО «Экономедиа»