



УДК 669.187.26

ПОЛУЧЕНИЕ СЛИТКОВ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ХН73МБТЮ СПОСОБОМ ЭШП ОТХОДОВ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

С. В. Скрипник, Д. Ф. Чернега

Показана возможность получения высококачественных слитков жаропрочного сплава ХН73МБТЮ на никелевой основе способом ЭШП расходоуемого электрода, собранного (сваренного) из отходов прокатного производства. Представлен химический состав, структура, механические свойства слитка диаметром 390 мм, массой 0,72 т. Показана перспективность применения новой ресурсосберегающей технологии на машиностроительном предприятии.

Possibility of producing high-quality ingots of heat-resistant alloy KhN73MBTYu on nickel base using method of ESR of consumable electrode, pressed (welded) of wastes of rolling production, is shown. The chemical composition, structure, mechanical properties of ingot of 390 mm diameter, 0.72 t mass are presented. The prospects of application of new resources-saving technology at machine-building enterprise are shown.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; электрические параметры; жаропрочный сплав; слиток; структура; механические свойства; дуплекс-процесс ВИП+ЭШП

Жаропрочный дисперсионно-твердеющий сплав ХН73МБТЮ (ЭИ698) широко применяется при изготовлении рабочих лопаток, турбинных дисков, колец и других деталей газовых турбин, работающих при значениях температуры до 750 °С. Для деталей ответственного назначения этот сплав получают из чистых от примесных элементов шихтовых материалов способом вакуумно-индукционной плавки (ВИП). Поэтому стоимость таких сплавов очень высокая, а коэффициент их использования из-за большого количества металлургических переделов сравнительно низок.

Во многих случаях изготовление дисков и колец газовых турбин осуществляется из штанг деформационными способами, включающими осадку, прошивку и раскатку. Прошивка заготовок в серийном производстве сопряжена с большими отходами металла, характеризующимися одинаковой геометрией и марочным химическим составом. Это создает предпосылки для электрошлаковой утилизации этих ценных материалов.

Данная статья посвящена изучению возможности получения слитков способом ЭШП из отходов жаропрочного никельхромового сплава ХН73МБТЮ прокатного производства или отбракованных деталей одинаковой конфигурации с марочным составом данного сплава на одном из машиностроительных предприятий.

Требовалось утилизировать кусковой материал одинаковой геометрии, например круглого сечения

и различной толщины одного марочного состава. Для сборки (сварки) расходоуемых электродов необходимо было подобрать сварочный материал, по возможности близкий по химическому составу к таковому основного сплава. При этом количество сварочного материала должно быть минимальным, но достаточным для надежного соединения элементов расходоуемого электрода с учетом характера его ЭШП, а также безопасности процесса плавки.

При выплавке слитков ЭШП высокого качества необходимо обеспечить оптимальное положение расходоуемого электрода относительно шлаковой ванны [1]. Для этого скорость подачи электрода и, следовательно, ток должны быть такими, чтобы погруженный в шлак конец электрода имел форму правильного конуса и оставался таким постоянно в течение всей плавки. А это означает, что соединение элементов составного расходоуемого электрода кольцевым швом по периметру его поперечного сечения не предотвращает возможного попадания в металлическую ванну кусков основного металла из-за первоначального расплавления шва.

Существует два надежных и безопасных для ведения плавки варианта сборки (сварки) составного расходоуемого электрода, имеющих свои преимущества и недостатки. Первый заключается в выполнении сварного шва по всему сечению расходоуемого электрода, например способом электрошлаковой сварки пластинчатым электродом, обеспечивающим высокую химическую однородность слитка.

Однако для такого способа требуется наличие пластинчатого электрода с составом, идентичным



Таблица 1. Химический состав основного и наплавленного металла

Материал	Массовая доля элементов, %										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	W	Al	Ti	S	P
ОЗЛ-25Б	0,06	0,34	2,25	19,0	1,9	1,6	0,19	–	–	0,007	0,016
ОЗЛ-44	0,05	0,025	1,90	21,3	2,4	–	0,2	0,10	0,10	0,010	0,010

Примечание. Основа – никель.

таковому основному металлу, а также соответствующего оборудования.

Второй способ предусматривает изготовление шва способом электродуговой сварки с обязательным привариванием верхней части каждого из соединяемых элементов к формируемому составному электроду и обеспечивает расплавление металла сварного шва только после расплавления соединяемого элемента из основного материала.

С учетом конфигурации используемых кусковых материалов, характеризующихся различными диаметрами (150... 170 мм) и толщиной (30... 40 мм), приняли второй вариант сборки (сварки) составных расходоуемых электродов. Наиболее подходящими по составу изготавливаемыми серийно сварочными электродами для ручной дуговой сварки являются электроды марок ОЗЛ-25Б и ОЗЛ-44 (табл. 1).

В соответствии с техническими требованиями к составу сплава ХН73МБТЮ (табл. 2), наиболее приемлемыми являются электроды марки ОЗЛ-25Б, содержащие такой важный легирующий элемент, как ниобий, который в сочетании с другими легирующими элементами сильно повышает пластичность сплава ХН73МБТЮ при длительных испытаниях в горячем состоянии, что важно при работе деталей с надрезом [2]. Он также участвует в образовании упрочняющей интерметаллидной фазы типа Ni₃Nb, а также карбидов, способствующих измельчению зерна.

Отсутствие алюминия и титана в составе сварочных электродов практически не отражается на конечном содержании этих элементов в слитке из-за их малого количества. При существенной доле сварочного металла можно восполнить нехватку этих элементов путем их дозированной подачи в шлаковую ванну в процессе плавки.

Поскольку в шлаке неизбежно присутствуют оксиды металлов с переменной валентностью типа железа, марганца, титана и др., то из-за протекания окислительно-восстановительных процессов при ЭШП, что необходимо учитывать, следует производить раскисление шлаковой ванны по ходу плавки.

Отличительной особенностью составного расходоуемого электрода является его повышенное электрическое сопротивление вследствие наличия большого количества сварных швов между соединяемыми элементами, что нужно учитывать при определении технологических параметров электрошлаковой плавки и увеличивать напряжение на трансформаторе. С одной стороны, для формирования хороших поверхности и качества слитка, обусловленных стабильностью параметров электрошлакового процесса, а также соблюдения техники безопасности требуется выполнение сварных швов сравнительно большого сечения и удовлетворительного качества. С другой, исходя из экономических соображений необходимо минимизировать объем трудоемких сварных швов, выполняемых из дорогостоящих и трудносвариваемых материалов.

С учетом этих факторов изготовили расходоуемый электрод (рис. 1), состоящий из 146 кусковых отходов в виде шайб массой по 4,5... 5,3 кг. Соединение шайб выполнено ручной дуговой сваркой за несколько технологических операций электродами диаметром 4 мм марки ОЗЛ-25Б. Длина составного электрода достигала 3,2 м, а поперечное сечение представляло собой прямоугольник 270... 280 мм. Расход сварочных материалов в виде электродов ОЗЛ-25Б составил 10 кг. Общая масса расходоуемого

Таблица 2. Химический состав проб жаропрочного сплава ХН73МБТЮ, отобранных по высоте опытного слитка ЭШП

Место отбора проб из осевой части слитка	Массовая доля элементов, %										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Fe	Al	Ti	S	P
Верх	0,04	0,30	0,16	14,80	2,8	2,0	0,66	1,57	2,35	0,004	0,003
2/3 высоты	0,04	0,31	0,17	14,70	2,7	2,0	0,68	1,57	2,35	0,004	0,004
1/3 высоты	0,04	0,31	0,17	14,77	2,7	2,0	0,68	1,56	2,35	0,003	0,004
Низ	0,04	0,31	0,16	14,75	2,7	2,0	0,68	1,56	2,35	0,002	0,004
Требования ТУ 14-1-5329-96	0,03... 0,07	≤0,50	≤0,40	13,0... 16,0	2,8... 3,2	1,90... 2,20	≤2,0	1,45... 1,80	2,35... 2,75	≤0,007	≤0,015

Примечание. Основа – никель.



Рис. 1. Составной расходимый электрод из отходов сплава ХН73МБТЮ

го электрода равнялась 0,72 т, а доля металла сварочных электродов — всего 1,4 %, что практически не повлияло на состав основного металла.

Составные расходимые электроды переплавлялись под флюсом АНФ-6 в электрошлаковой печи



Рис. 2. Фрагмент плавки слитка из сплава ХН73МБТЮ на установке УШ116

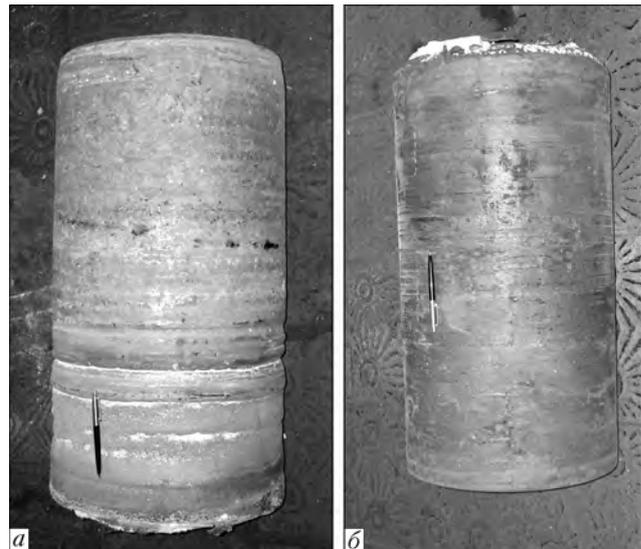


Рис. 3. Слитки сплава ХН73МБТЮ массой 0,72 т, выплавленные по режиму, принятому по серийной технологии для электрода сплошного сечения (а) и по оптимальному режиму, принятому для переплава составного электрода приведенной конструкции (б)

УШ-116 (рис. 2). Шлаковую ванну по ходу плавки раскисляли первичным порошковым алюминием из расчета 3,5 кг на 1 т сплава. Раскисление шлака алюминиевым порошком позволило обеспечить полное усвоение титана и алюминия из исходного металла (табл. 2). Попытка вести плавку в обычном для слитка заданного диаметра электрическом режиме вызвала определенные технологические трудности относительно стабильности процесса, в частности, невозможности получать слитки с качественной поверхностью (рис. 3, а). Оптимальные параметры основного периода плавки составного расходимого электрода указанной конструкции следующие: ток переплава — 8,5...9,0 кА, напряжение — 60 В; глубина шлаковой ванны — 120... 130 мм; коэффициент заполнения кристаллизатора — 0,32... 0,35; производительность плавки — 0,36 т/ч.

Полученный опытный слиток ЭШП диаметром 390 мм, высотой 760 мм и массой 0,72 т имел ровную гладкую поверхность без пережимов (рис. 3, б). Макроструктура слитка отличалась высокой плотностью, отсутствием ликвационных, кристаллизационных и прочих дефектов (рис. 4). Микроструктура была однородной, мелкозернистой с равномерным распределением дисперсных частиц упрочняющих интерметаллидных фаз (рис. 5). Значения механических свойств литого сплава опытного слитка существенно превышали таковые, регламентируемые техническими условиями на деформирован-

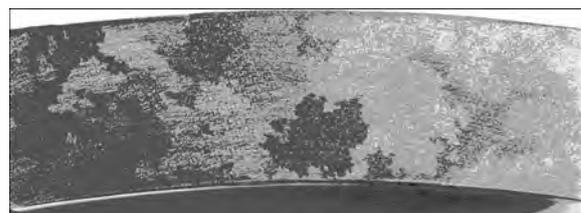


Рис. 4. Фрагмент макроструктуры (X3) слитка сплава ХН73МБТЮ

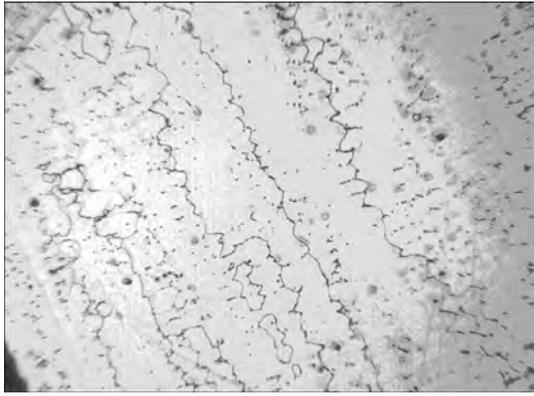


Рис. 5. Микроструктура (X40) слитка сплава ХН73МБТЮ

кую физическую и химическую однородность слитка, т. е. предопределяет стабильно высокие значения физических и механических свойств конечного продукта [5]. Технологическая схема ВИП+ЭШП, используемая в производстве жаропрочных сплавов, завоевала признание во всех передовых странах мира [5].

В последние годы все большее значение приобретает проблема переработки отходов легированных сталей и сплавов. Слишком дорогостоящими и дефицитными являются такие элементы, как ниобий, молибден, вольфрам, никель, чтобы терять их безвозвратно. Электрошлаковые технологии позволяют перерабатывать дорогие металлоотходы в вы-

Таблица 3. Кратковременные механические свойства и длительная прочность металла ЭШП сплава ХН73МБТЮ

Режим термообработки	Место отбора пробы	Температура испытания, °С	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	$KCU, 2$ Дж/см ²	HV , МПа	Длительная прочность	
									σ , МПа	τ , ч
Закалка, 1120 °С, 8 ч, воздух	В	20	1243	873	22,3	27,3	66	3620	–	–
	С		1250	873	25,1	34,3	79	3621	–	–
	Н		1256	846	23,0	30,1	68	3625	–	–
Отпуск 1000 °С, 4 ч, воздух	В	750	–	–	–	–	–	–	400	91,0
	С		–	–	–	–	–	–	400	91,3
	Н		–	–	–	–	–	–	400	89,2
Старение при 750 °С, 20 ч, воздух	В	20	–	–	–	–	–	–	–	–
	С		–	–	–	–	–	–	–	–
Требования ТУ 14-1-5329-96 (не менее)	–	750	1150	720	16	18	39	2860...3400	–	–
	–	750	–	–	–	–	–	–	390	50,0

Примечание. В – верх, С – середина, Н – низ слитка.

ный сплав данной марки (табл. 3). Это, вероятно, обусловлено тем, что металл фактически подвергся дуплекс-процессу ВИП+ЭШП.

Жаропрочным сплавам на никелевой основе первичная плавильная операция (процесс ВИП), обеспечивает высокий уровень чистоты жидкого металла: снижение содержания газов, неметаллических включений, а также вредных легкоплавких примесей, таких как олово, свинец, сурьма, мышьяк, висмут, серебро и др. [3, 4]. Однако для получения металла необходимого качества в конечном продукте этого недостаточно. Оптимальным процессом вторичного рафинирующего переплава (среди процессов ВДП, ПДП, ЭЛП и ЭШП) для жаропрочных сплавов на никелевой основе такого состава является ЭШП, обеспечивающий последовательное затвердевание постоянного во времени относительно небольшого объема жидкого металла. Такого рода кристаллизация обуславливает высо-

сококачественные заготовки деталей газотурбинных двигателей, удешевляя конечный продукт. Это особенно важно в период экономического спада и выхода промышленности из кризиса.

1. Латаш Ю. В., Медовар Б. И. Электрошлаковый переплав. – М.: Металлургия, 1970. – 240 с.
2. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1969. – 750 с.
3. Электрошлаковый металл / Под ред. Б. Е. Патона и Б. И. Медовара. – Киев: Наук. думка, 1981. – 680 с.
4. Гуляев А. П. Чистая сталь. – М.: Металлургия, 1975. – 184 с.
5. Патон Б. Е., Медовар Б. И. Тридцатилетие электрошлакового переплава // Электрошлаковая технология: Сб. ст., посвященных 30-летию электрошлакового переплава / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара, Г. А. Бойко. – Киев: Наук. думка, 1988. – С. 5–11.

НПФ «Титан», Киев
НТУУ «Киевский политехнический институт»
Поступила 05.02.2010