



УДК 669.187.826

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ СЛИТКОВ-СЛЯБОВ НИКЕЛЯ СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ

Н. П. Тригуб, В. А. Березос,
В. Д. Корнийчук, Ю. А. Мосунов

Представлены результаты экспериментальных исследований по переплаву лома никеля способом электронно-лучевой плавки. Создана технология получения высококачественных слитков-слябов никеля.

Results of experimental investigations on remelting of nickel scrap using the method of electron beam melting are presented. Technology was developed for producing high-quality ingots-slabs of nickel.

Ключевые слова: никель; электронно-лучевая плавка; слитки-слябы; рафинирование

Благодаря разработке новых конструкционных материалов, в которых никель является основным или легирующим элементом, спрос на них постоянно увеличивается.

Основные потребители никеля — металлургическая, энергетическая, химическая и другие отрасли промышленности. Из чистого никеля изготавливают различные аппараты, приборы, котлы и тигли с высокой коррозионной стойкостью и постоянством физических свойств. Особое значение имеют никелевые материалы при изготовлении резервуаров и цистерн для нужд энергетической и химической отраслей промышленности.

В Украине имеются небольшие залежи никелевых руд, уже истощающиеся. В частности, запасы никелевого месторождения Липовенковское в центральной Украине могут быть исчерпаны за 5 лет [1]. Спрос на никель в Украине практически полностью удовлетворяется за счет импорта. В этой связи разработка технологии получения высококачественных слитков никеля из лома является актуальной задачей.

Современная промышленность, особенно энергетическая, нуждается в полуфабрикатах из цветных металлов и сплавов с минимальным содержанием газов и примесей, а также отличающихся высокими значениями плотности и пластичности.

Многие из примесей относятся к вредным, резко ухудшающим физико-химические свойства металлов и сплавов. Разработка эффективных способов защиты от проникновения вредных примесей и удаление их в процессе получения и дальнейшей обработки металлов является одной из основных проблем современной металлургии.

Электролитическое рафинирование никеля, проводимое с целью очистки от вредных примесей, позволяет получать металл довольно высокой степени чистоты (99,90... 99,99 %) [2]. Однако сохранить этот показатель при переплаве электролитического никеля в слитки весьма трудно.

Совершенствование технологии производства никеля высокой степени чистоты осуществляли путем выплавки его в вакуумных индукционных или дуговых печах. При вакуумной индукционной плавке никеля все же не удается полностью предотвратить его загрязнение вследствие взаимодействия с футеровкой тигля [3].

Вакуумный дуговой переплав исключает загрязнение никеля, поскольку производится в водоохлаждаемый кристаллизатор. Однако при этом способе никель слабо рафинируется от газов и практически не рафинируется от других примесей [4]. Кроме того, при вакуумном дуговом переплаве предъявляются очень высокие требования к расходуемым электродам (должны пропускать большие токи), удовлетворить которые при сборке электро-

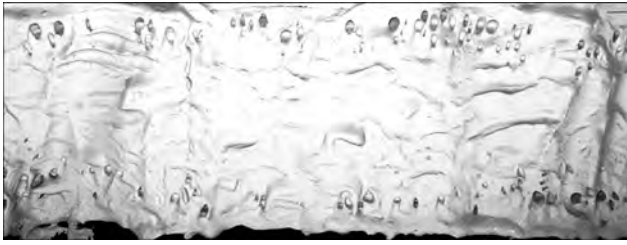


Рис. 1. Газовая пористость на оплавленном торце слитка никеля в зоне контакта со стенками кристаллизатора

дов из электролитических пластин никеля весьма трудно [5].

Анализ различных способов выплавки слитков никеля показал, что наиболее эффективным и экономически оправданным процессом получения особо чистых слитков никеля путем утилизации лома никеля является технология электронно-лучевой плавки (ЭЛП), обеспечивающая наибольшую степень рафинирования никеля при наименьших затратах [4]. Она позволяет осуществлять практически полную утилизацию отходов в виде листовой обрезки, кусковых отходов, стружки. При этом отсутствует необходимость в такой трудоемкой операции, как изготовление компактного расходоуемого электрода.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины накоплен опыт по повышению степени чистоты, улучшению структуры и свойств никеля способом ЭЛП [4].

Экспериментальные исследования проводили на промышленной электронно-лучевой установке УЭ5812 [6], на которой из лома никеля выплавляли слитки-слябы прямоугольного сечения.

В качестве шихты использовали лом никеля в виде пластин катодного никеля марки Н1, а также стружку никеля марки НП2. Размеры кусков лома не превышали 10×500×1000 мм. Поверхность лома очищали от различных видов загрязнения. Формирование расходоуемого электрода осуществляли в нерасходоуемом коробе. После формирования расходоуемой заготовки установку герметизировали и вакуумировали.

В процессе плавки исходная шихта непрерывно с заданной скоростью подавалась в зону плавки над промежуточной емкостью, где под действием электронно-лучевого нагрева происходило ее сплавление. После наполнения промежуточной емкости жидкий металл сливали в водоохлаждаемый медный кристаллизатор. По мере наплавки слиток опускали вниз механизмом вытягивания по непрерывному режиму (после повышения уровня жидкого металла в кристаллизаторе на 10... 15 мм с линейной скоростью $(2... 3) \cdot 10^{-4}$ м/с до тех пор, пока ванна не достигала прежнего уровня). Вытягивание слитка производили после каждого слива порции жидкого металла в кристаллизатор.

В ходе плавки контролировали следующие технологические параметры: скорость подачи шихты, ускоряющее напряжение и ток луча. Скорость плавки регулировали скоростью подачи исходной ших-

Таблица 1. Содержание газов в никеле до и после ЭЛП

Марка шихты	Состояние	Массовая доля газов, %		
		[O]	[N]	[H]
Н1	Исходное	0,004	0,0013	0,0003
	После ЭЛП	0,0002	0,0003	0,0001
НП2	Исходное	0,005	0,0022	0,0018
	После ЭЛП	0,0003	0,0003	0,0001

ты в зону плавки, а численные значения ускоряющего напряжения и тока луча измеряли соответствующими приборами.

В стационарном режиме наплавляли слиток необходимой длины. Затем в головной части слитка выводили усадочную раковину. Слитки остывали в вакууме вместе с камерой. Установку развакуумировали и выгружали слиток цеховым краном.

Водород и азот не образуют с никелем соединений, устойчивых при высоких температурах [2]. В расплавленном состоянии никель может растворять большое количество газов (азот, водород, кислород), которые, выделяясь при кристаллизации металла из-за резкого уменьшения растворимости газов с понижением температуры жидкого металла, приводят к образованию в слитках пор.

Вследствие большой скорости охлаждения слитка вблизи стенок водоохлаждаемого медного кристаллизатора при ЭЛП растворенные в жидком металле газы не успевают выйти из жидкой ванны и часть их остается в затвердевшем металле, образуя пустоты – газовую пористость (рис. 1). При затвердевании металла эти газы также могут взаимодействовать между собой с образованием паров воды, которые из-за невозможности диффундировать через металл способствуют образованию пористости в слитке. При попадании этих газов в жидкую ванну могут проходить реакции типа $NiO + 2H = Ni + H_2O$, $NiO + C = Ni + CO$ [2].

С целью предотвращения возникновения газовой пористости при выплавке слитков никеля уве-



Рис. 2. Внешний вид слитков-слябов никеля



Таблица 2. Химический состав слитков никеля

№ образцов	Массовая доля элементов, %							
	C	Mg	Si	P	S	Mn	Fe	Cu
Исходный	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-5}$	$2,41 \cdot 10^{-4}$	$1,01 \cdot 10^{-3}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$1,69 \cdot 10^{-3}$	$1,51 \cdot 10^{-2}$	$1,09 \cdot 10^{-2}$
1	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$1,97 \cdot 10^{-5}$	$1,63 \cdot 10^{-5}$	$6,77 \cdot 10^{-5}$	$6,03 \cdot 10^{-5}$	$4,41 \cdot 10^{-3}$	$3,91 \cdot 10^{-4}$
2	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$2,01 \cdot 10^{-5}$	$2,09 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$8,75 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$3,52 \cdot 10^{-3}$	$4,58 \cdot 10^{-5}$
3	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-5}$	$7,42 \cdot 10^{-5}$	$3,23 \cdot 10^{-5}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$3,24 \cdot 10^{-4}$
ГОСТ 492-2006	0,1	0,1	0,15	0,002	0,005	0,05	0,01	0,01

№ образцов	Массовая доля элементов, %							
	Zn	As	Cd	Sn	Sb	Pb	Bi	Ni+Co
Исходный	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$2,02 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$6,95 \cdot 10^{-5}$	$2,77 \cdot 10^{-5}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	99,718
1	$2,50 \cdot 10^{-6}$	$6,49 \cdot 10^{-5}$	$5,80 \cdot 10^{-6}$	$2,42 \cdot 10^{-5}$	$7,90 \cdot 10^{-6}$	$1,05 \cdot 10^{-5}$	$0,1 \cdot 10^{-6}$	99,982
2	$1,19 \cdot 10^{-4}$	$0,30 \cdot 10^{-6}$	$5,60 \cdot 10^{-6}$	$1,10 \cdot 10^{-6}$	$9,50 \cdot 10^{-6}$	$1,92 \cdot 10^{-5}$	$0,1 \cdot 10^{-6}$	99,969
3	$5,30 \cdot 10^{-6}$	$3,29 \cdot 10^{-5}$	$7,50 \cdot 10^{-6}$	$3,54 \cdot 10^{-5}$	$6,90 \cdot 10^{-6}$	$2,35 \cdot 10^{-5}$	$0,1 \cdot 10^{-6}$	99,921
ГОСТ 492-2006	0,007	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	99,500

личили время выдержки жидкого металла в промежуточной емкости и кристаллизаторе. При последующем переплаве на оптимизированных режимах электронно-лучевой плавки газовой пористости в слитках никеля не обнаружено.

Слитки никеля электронно-лучевой плавки подвергали анализам на содержание газов и других примесей (табл. 1).

Измерения химического состава образцов исходной шихты никеля и слитков-слябов после ЭЛП выполняли на установке INA-10 (Leybold-Heagues, Германия) методом масс-спектрометрии вторичных пост-ионизированных нейтральных частиц.

Анализ химического состава выплавленных слитков-слябов никеля показал (табл. 2), что в процессе ЭЛП многие легкоплавкие примеси удалялись, уменьшалось количество неметаллических включений.

При ЭЛП сплавов на основе никеля существенно снижается содержание цинка, висмута, свинца и других легкоплавких примесей. Массовые доли кремния и углерода изменяются незначительно.

В ходе ЭЛП жидкий никель не смачивает стенки кристаллизатора, поэтому боковая поверхность слитков становится гладкой блестящей (рис. 2).

Процесс ЭЛП никеля и его сплавов достаточно экономичен. Расход электроэнергии составляет 1,0... 1,2 кВт·ч/кг. Слитки не имеют усадочных раковин и отличаются значительно более высокой сте-

пенью чистоты, по сравнению с промышленными марками никеля НП2 (табл. 2).

Выводы

1. Проведенные исследования показали перспективность применения технологии ЭЛП для утилизации лома никеля. Продемонстрирована эффективность рафинирования лома никеля от газов и примесей способом ЭЛП.

2. С использованием способа ЭЛП выплавлены высококачественные слитки никеля чистотой 99,9 мас. %.

3. Разработана технология получения высококачественных слитков-слябов никеля способом ЭЛП.

1. *Richard M. Levine*. The mineral industry of Ukraine // U. S. Geological survey-minerals information. — 2008. — V. 1-5.
2. *Перельман Ф. М., Зворыкин А. Я.* Кобальт и никель. — М.: Наука, 1975. — 215 с.
3. *Бобылев А. В.* Механические и технологические свойства металлов: Справочник. — М.: Металлургия, 1987. — 208 с.
4. *Мовчан Б. А., Тихоновский А. Л., Курапов Ю. А.* Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. — Киев: Наук. думка, 1973. — 240 с.
5. *Уткин Н. И.* Металлургия цветных металлов. — М.: Металлургия, 1985. — 440 с.
6. *Промышленная электронно-лучевая установка УЭ-5812* // Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, В. Д. Корнийчук и др. // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 1. — С. 11-14.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
 ООО «ТехМетСплав», Уфа
 Поступила 20.04.2011