



12. Коган Я. Д., Колачев Б. А., Левинский Ю. В. Константы взаимодействия металлов с газами. Справочник — М.: Металлургия, 1987. — 268 с.
13. Вульф Б. К. Термическая обработка титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1969. — 375 с.
14. Свойства элементов. Физические свойства. Справочник / Под ред. Г. В. Самсонова. — М.: Металлургия, 1976. — 600 с.
15. Фромм Е., Гебхард Е. Газы и углерод в металлах: Пер. с нем. / Под ред. Б. В. Линчевского. — М.: Металлургия, 1980. — 711 с.
16. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. — М.: Физматгиз, 1959. — 699 с.
17. Математическое моделирование процессов рафинирования металлов от газов при электронно-лучевом переплаве с промежуточной емкостью / С. В. Ахонин, Н. П. Тригуб, А. Н. Калинин, С. В. Цвелодуб // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1995. — № 2. — С. 36–42.
18. Bewley B. P., Gigliotti M. F. X. Dissolution rate measurements of TiN in Ti-6242 // Acta met. — 1977. — 45, N 1. — P. 357–370.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 12.09.2000

УДК 669.187.526.001.5

УДАЛЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ И ГАЗОВ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКЕ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЕМКОСТЬЮ

О. Н. Козловец, Н. П. Тригуб, А. Н. Пикулин

Приведены результаты сравнительных исследований качества сплавов на основе никеля открытой дуговой, вакуумно-дуговой плавки и электронно-лучевой переплава с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). Изучено влияние переплава на содержание неметаллических включений и газов. Показано, что наиболее полно идет рафинирование от водорода, остаточное содержание которого не превышает 0,00006...0,00009 %. В процессе ЭЛПЕ металл полнее очищается от вредных газовых примесей, а неметаллические включения уменьшаются в размерах и более равномерно распределяются по сечению слитка.

Results of comparative investigations of quality of nickel-based alloys using open arc, vacuum-arc melting and electron beam remelting with an intermediate crucible are given. The effect of remelting on the content of non-metallic inclusions and gases was examined. It is shown that the most complete refining is provided from hydrogen whose residual content does not exceed 0.00006...0.00009 %. During EBMIC the metal is refined from harmful gas impurities, and the non-metallic inclusions are decreased in sizes and distributed more uniformly in the ingot section.

Ключевые слова: рафинирование; электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью; неметаллические включения; газы; карбиды

Основным процессом получения качественных слитков из сплавов на основе никеля в промышленности до настоящего времени остается вакуумно-дуговая плавка с расходуемым электродом (ВДП). Для жаропрочных сплавов на основе никеля с этой целью используют дуплекс-процесс: электроды для ВДП получают вакуумно-индукционной плавкой. В последние годы в производстве слитков из сплавов на основе никеля находят применение альтернативные методы плавки, основанные на процессах с независимым источником нагрева,

такие как электронно-лучевая и плазменно-дуговая. Интерес к их использованию вызван, прежде всего, возросшими требованиями к качеству металла со стороны потребителей продукции аэрокосмического назначения [1].

Плавка в электронно-лучевых печах с промежуточной емкостью в наибольшей степени отвечает задачам получения бездефектных слитков никелевых сплавов. Такое преимущество электронно-лучевой переплава основывается на наличии концентрированного источника нагрева, позволяющего в широких пределах изменять температуру жидкого металла, а также вести плавку с переливом и осуществлять контролируемое затвердевание рас-

© О. Н. КОЗЛОВЕЦ, Н. П. ТРИГУБ, А. Н. ПИКУЛИН, 2001

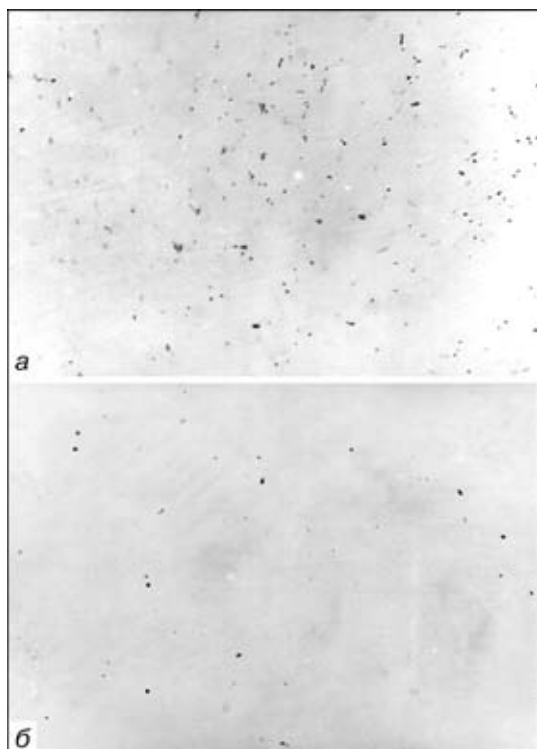


Рис. 1. Характер распределения неметаллических включений в сплаве ЭП975 после ВДП (а) и ЭЛПЕ (б)

плавленного металла в кристаллизаторе. Процессы рафинирования при ЭЛПЕ протекают в три стадии — на торце оплавленной заготовки, в промежуточной емкости и в кристаллизаторе, что способствует уменьшению содержания газов и неметаллических включений [1].

Исследовали образцы ЭЛПЕ из никелевых сплавов ЭП741, ЭП975 вакуумно-дуговой плавки, а также ЭИ698 открытой дуговой плавки. Содержание газов в слитках сплавов на основе никеля после ЭЛПЕ приведено в табл. 1. Наиболее полно происходит рафинирование от водорода. Остаточное его содержание составляет не более 0,00006... 0,00009 % вне зависимости от исходного содержания. Незначительно снижается концентрация кислорода и азота. Четкой зависимости содержания газов в металле слитков ЭЛПЕ от скорости плавки не наблюда-

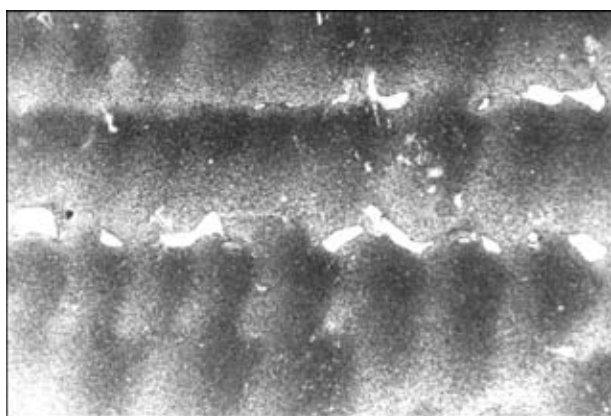


Рис. 2. Выделения эвтектики (γ – γ') и карбидов МС в междендритных объемах литого никелевого сплава ЭП975

Таблица 1. Содержание газов в сплавах на основе никеля после ЭЛПЕ

Способ переплава	Сплав	Содержание, %		
		[O]	[N]	[H]
ОД	ЭИ698	0,0022	0,0051	0,00170
ЭЛПЕ		0,0015	0,0034	0,00009
ВДП	ЭП741	0,0035	0,0012	0,00012
ЭЛПЕ		0,0021	0,00064	0,00007
ВДП	ЭП975	0,0018	0,00214	0,00004
ЭЛПЕ		0,0017	0,00086	0,00003

Примечание. Скорость ЭЛПЕ составляла 150 кг/ч.

ется. Следует заметить, что полученные данные о содержании оксидных включений хорошо согласуются с результатами определения содержания кислорода в сплавах.

Металлографические исследования образцов ЭЛПЕ никелевых сплавов осуществляли на оптическом микроскопе «Neophot 32», а для идентификации фаз и определения химического состава использовали аналитический электронный микроскоп и микроанализатор «Ка-мека» (MS-46).

На всех исследованных образцах основным видом включений были первичные карбиды типа МС (рис. 1, а, б). Большей частью такие карбиды выделяются из жидкой фазы при

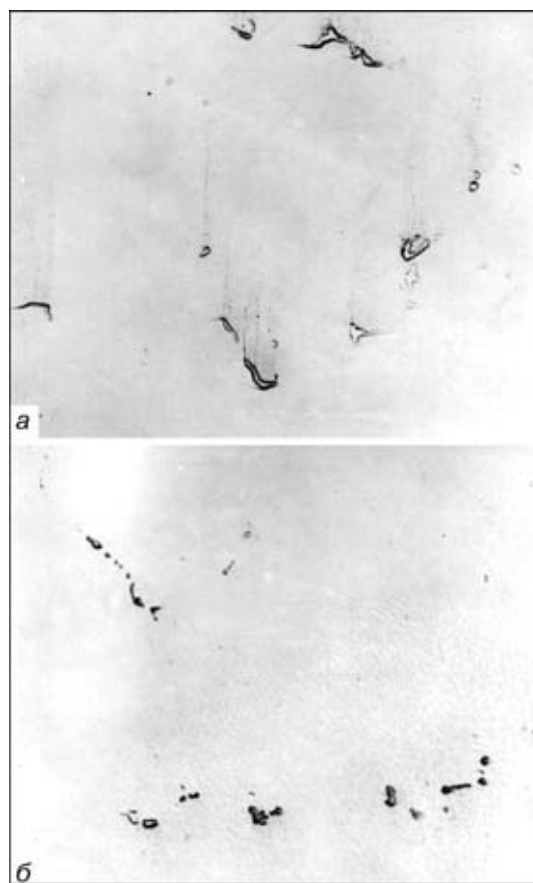


Рис. 3. Распределение карбонитридов в сплаве ЭП975 после ВДП (а) и ЭЛПЕ (б)

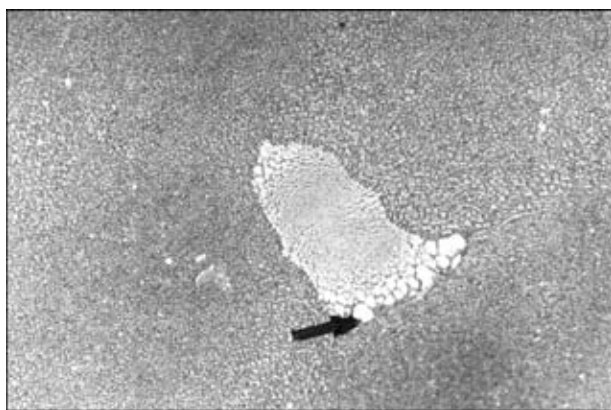


Рис. 4. Карбонитридные включения в составе эвтектики ($\gamma - \gamma'$)

кристаллизации и располагаются в междендритных пространствах (рис. 2). Карбиды чаще всего содержат небольшое количество азота и, по сути, являются карбонитридами $M(C, N)$.

На образцах никелевых сплавов, выплавленных в открытой дуговой и вакуумно-дуговой печах, чаще всего наблюдались крупные включения правильной формы (полиэдрической морфологии) розоватого цвета, а также включения в форме «иероглифов», образующиеся в результате эвтектической реакции в процессе затвердевания и классифицирующиеся как эвтектические. Иногда наблюдались скопления, огрубляющие структуру. Преимущественный размер карбидов 10...20 мкм, иногда встречались крупнее — до 30 мкм (рис. 3, а). Более мелкие карбиды разбросаны в межосных участках и по телу зерна, но распределены они неравномерно. Карбидная фаза ограниченной формы встречалась и на периферии эвтектик ($\gamma - \gamma'$) (рис. 4).

Как полигональные карбиды, так и карбиды в форме «иероглифов» представляли собой карбиды типа $M(C, N)$, а морфология их определялась химическим составом и температурой образования. При металлографических исследованиях какой-либо строгой ориентировки карбидов относительно матрицы не обнаружено.

Исследование химического состава карбонитридных фаз, проведенное с помощью микрорентгеноспектрального анализа непосредственно на шлифах без изолирования фаз, показало, что карбидные фазы имеют переменный состав с преимущественным содержанием ниобия, титана, вольфрама, молибдена (элементы расположены в порядке уменьшения их концентрации в фазе).

Более крупные включения представляют собой $(Nb, Ti, W)C$, на границах эвтектик — NbC , в которых часть атомов ниобия заменена

Таблица 2. Механические свойства никелевых жаропрочных сплавов в литом состоянии после ЭЛПЕ

Сплав	$\sigma_{0,1}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ , %	ψ , %	a_{11} , кДж/м ²
ЭИ698	915	541	19,0	22,0	810
	820	530	16,0	17,0	567
ЭП741	950	702	17,0	19,0	597
	910	765	16,0	16,4	440
ЭП975	1020	808	16,0	19,0	547
	967	829	16,2	16,6	430

Примечания: 1. Приведены средние значения из результатов испытаний трех образцов. 2. Над чертой представлены данные для образцов, вырезанных вдоль слитка, под чертой — поперек слитка.

атомами титана. В сплавах присутствуют карбобориды сложного состава, содержащие вольфрам, молибден, хром. Различия по морфологии и химическому составу фаз связано с их образованием при различной температуре.

При кристаллизации жидкого металла в процессе ЭЛПЕ формируется более дисперсная структура, что способствует измельчению всех фаз, выделяющихся в межосных пространствах, в том числе и неметаллических включений [2, 3] (рис. 1, б).

ЭЛПЕ не оказал влияния на фазовый состав, но уменьшил количество выделений карбидов, а также существенно повлиял на их морфологию. На образцах никелевых сплавов после ЭЛПЕ преимущественный размер включений составлял до 5 мкм. Грубых включений карбидов, которые являются концентраторами напряжений и могут привести к разрушению, не выявлено (рис. 3, б).

Другие фазы если и присутствовали в сплавах, то в столь незначительных количествах, что при исследовании методом микрорентгеноспектрального анализа обнаружены не были.

Таким образом, в процессе ЭЛПЕ металл полнее очищается от вредных газовых примесей и неметаллических включений, которые уменьшаются в размерах и более равномерно распределяются по сечению слитка. Как следует из табл. 2, повышение чистоты металла после ЭЛПЕ обеспечивает требуемое сочетание прочности и пластичности.

1. *Электронно-лучевая плавка* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 267 с.
2. *Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления* / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
3. *Масленков С. Б., Масленкова Е. А.* Стали и сплавы для высоких температур. Справ. изд. — М.: Металлургия, 1991. — 832 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 10.01.2001