



УДК 669.187.526:51.001.57

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ПЛАВКА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЕМКОСТЬЮ

Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, С. В. Ахонин

Методами математического моделирования изучены теплофизические особенности кристаллизации слитков жаропрочных никелевых сплавов при электронно-лучевой плавке с порционным сливом жидкого металла из промежуточной емкости в кристаллизатор. Установлены оптимальные режимы плавки, позволяющие получать качественные слитки с однородной мелкозернистой структурой, без дефектов усадочного характера. Показано, что предложенная технология обеспечивает высокую химическую однородность слитков и более низкую ликвацию легирующих элементов, чем способ вакуумно-дугового переплава.

Using the methods of mathematical modelling, the thermophysical peculiarities of crystallization of heat-resistant nickel alloy ingots in electron beam melting with a portion pouring of molten metal from an intermediate crucible into a mould are studied. The optimum melting conditions were established allowing producing the quality ingots with a uniform fine-grain structure without shrinkage defects. It is shown that the technology offered provides the high chemical homogeneity of ingots and lower liquation of alloying elements as compared with the method of a vacuum-arc remelting.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; промежуточная емкость; жаропрочные сплавы; порционный слив

В настоящее время слитки жаропрочных сплавов на основе никеля получают в основном способом вакуумно-дугового переплава (ВДП). Наряду с известными преимуществами этому процессу присущ и ряд недостатков: разнородная структура слитков ВДП диаметром более 0,35 м, что влечет за собой микроликвацию, сопоставимую с ликвацией обычного слитка [1]; большой объем жидкой металлической ванны, вследствие чего возникают температурные напряжения, которые без применения специальных условий охлаждения могут привести к растрескиванию слитка по окончании процесса переплава или при деформации; обширная зона крупных столбчатых кристаллов способствует развитию дендритной ликвации и является одной из причин брака металла при обработке давлением [2]. Следовательно, оптимальным способом производства слитков жаропрочных сплавов должен считаться тот, который одновременно обеспечивает мелкодисперсную гомогенную физически и химически однородную структуру при отсутствии температурных напряжений.

Разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины технология электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) и порционным сливом жидкого металла в кристаллизатор обеспечивает не только высокую очистку от вредных при-

месей, но и значительное улучшение структуры слитка [3]. Это обусловлено разделением процессов плавления металла (в промежуточной емкости) и затвердевания металла (в кристаллизаторе). Поэтому между температурой ванны металла и скоростью плавления нет прямой связи, что позволяет, во-первых, в широких пределах регулировать скорость кристаллизации без изменения скорости плавки v , во-вторых, существенно изменять геометрию фронта кристаллизации. При соответствующем распределении энергии электронно-лучевого нагрева путем применения нескольких пушек или перемещения луча с высокой частотой по заданной траектории по поверхности расплава можно получать практически плоский фронт кристаллизации, что не достижимо при традиционных способах плавки.

Наличие металлической ванны влечет за собой появление усадочной раковины в головной части слитка, что требует специальных приемов для предотвращения возникновения последней при окончании процесса плавки. По технологии ЭЛПЕ с порционным сливом жидкого металла в кристаллизатор зоной рафинирования являются оплавленная поверхность расходуемой заготовки и свободная поверхность жидкого металла в промежуточной емкости; в зону кристаллизации подаются небольшие порции жидкого металла; металлическая ванна

© Н. П. ТРИГУБ, Г. В. ЖУК, С. В. АХОНИН, 2004



имеет ограниченный объем. Периферийную зону слитка необходимо поддерживать в жидком состоянии для обеспечения качественной боковой поверхности и растекания металла заливаемой порции по верхнему торцу.

Технология ЭЛПЕ с порционным сливом жидкого металла имеет ряд существенных преимуществ перед традиционными технологиями ЭЛП. Малый объем подаваемой порции жидкого металла из промежуточной емкости в кристаллизатор подавляет процессы конвекции в расплаве при его кристаллизации. Последовательная послойная кристаллизация металла в кристаллизаторе с наличием в каждый момент времени малого объема жидкого металла исключает развитие в слитке зональной ликвации, а также образование дефектов усадочного происхождения.

Плотная макроструктура, химическая однородность, высокая чистота по неметаллическим включениям благоприятно влияют на качество получаемых изделий, повышают их надежность и долговечность. Технология позволяет выплавлять слитки практически неограниченной массы при сравнительно малой мощности электронно-лучевой установки.

Для расчета тепловых условий формирования слитка (температурного поля, скоростей охлаждения и кристаллизации, градиентов температурного поля) под руководством Козлитина Д. А. была разработана математическая модель, основу которой составляет дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат, записанное для случая осевой симметрии температурного поля [3, 4] в виде

$$C_V \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right); \quad (1)$$

$$r < R_2; \quad 0 < z < s(t); \quad t > 0,$$

где C_V — объемная теплоемкость расплава с учетом теплоты фазового перехода; T — температура; $\lambda(T)$ — коэффициент теплопроводности; R_2 — радиус слитка; $s(t)$ — высота слитка; t — текущее время.

При расчетах по математической модели принималась во внимание зависимость теплофизических характеристик материала слитка от температуры. Коэффициент теплопроводности в уравнении (1) учитывал молекулярную и конвективную теплопроводность в жидкой фазе, а объемная теплоемкость — выделение скрытой теплоты кристаллизации в интервале $[T_S, T_L]$.

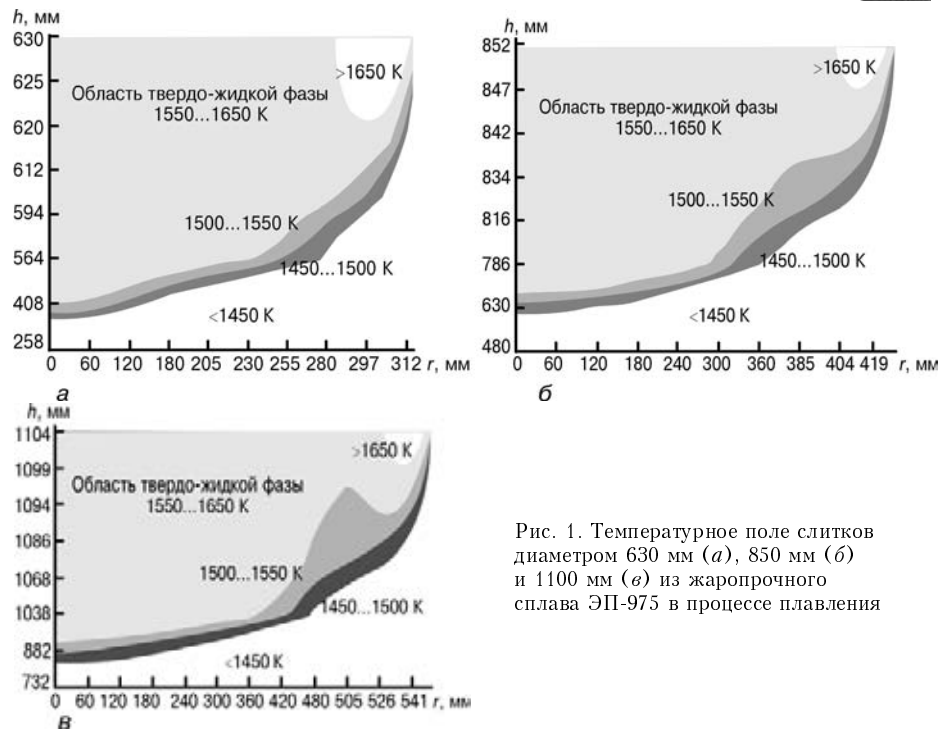


Рис. 1. Температурное поле слитков диаметром 630 мм (а), 850 мм (б) и 1100 мм (в) из жаропрочного сплава ЭП-975 в процессе плавления

Граничные условия, описывающие теплообмен слитка с окружающей средой, учитывают условия обогрева головной части слитка электронными лучами, тепловое излучение с поверхности слитка по закону Стефана–Больцмана и теплопередачу в зонах контакта слитка с водоохлаждаемыми стенками кристаллизатора и поддона.

В процессе затвердевания слитков из сплавов, особенно многокомпонентных, получают развитие сложные кристаллизационные и ликвационные явления, вызывающие образование химической и физической неоднородности слитка. В наибольшей степени эти неблагоприятные процессы наблюдаются при кристаллизации крупного слитка.

Для определения оптимального технологического режима выплавки слитков жаропрочных сплавов методом электронно-лучевой порционной плавки с промежуточной емкостью с помощью математической модели (1) были рассчитаны температурные поля в слитках диаметром 0,63; 0,85 и 1,15 м и проанализированы условия кристаллизации металла.

С целью получить минимальный размер зерна высота заливаемой порции жидкого металла принята равной 5...6 мм. Это минимально возможная порция для обеспечения удовлетворительного растекания

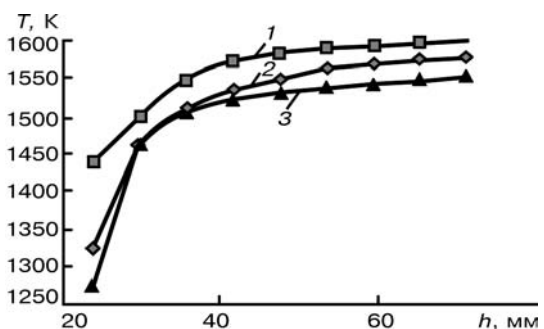


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности слитка от его высоты перед заливкой очередной порции: 1 — диаметр слитка 630 мм; 2 — 850 мм; 3 — 1100 мм

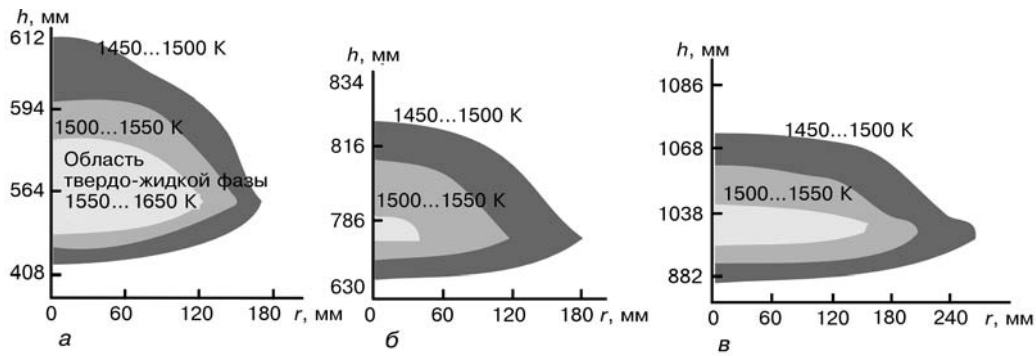


Рис. 3. Формирование усадочной раковины в слитках жаропрочного сплава ЭП-975 диаметром 630 мм через 900 с после выключения источника нагрева (а), диаметром 850 мм через 1050 с после выключения источника нагрева (б), диаметром 1100 мм через 1260 с после выключения источника нагрева (в)

ния расплава по поверхности слитка. Расчеты проводили до выхода режима плавки на квазистационарный, при котором изменение температурного поля в слитке в промежутках между заливками переставало зависеть от его высоты. Этот момент наступал при наплавлении слитка высотой h около 0,6; 0,8 и 1,1 м, т. е. когда высота слитка достигала значения его диаметра (рис. 1, а-в).

Температура поверхности слитка перед заливкой очередной порции при различных диаметрах слитков представлена на рис. 2. При этом температура свободной поверхности металла в кристаллизаторе не превышает 1600 К. Следовательно, жидкий металл последующей порции будет заполнять междендритные каналы, образовавшиеся при затвердевании предыдущей порции, и структура слитка будет плотная, без пор и междендритных пустот.

Скорость охлаждения очередной порции жидкого металла составляет около 10 К/с, причем весь объем расплава остывает практически одновременно. Поэтому происходит объемная кристаллизация порции металла с образованием равноосной мелкозернистой структуры.

Одним из основных дефектов кристаллизационного характера в слитках является усадочная раковина (усадочная рыхлость). В слитках жаропрочных сплавов усадочная раковина представляет собой полость или совокупность ячеек и пор, сосредоточенных в головной части слитка и изолирован-

ных от окружающей среды с помощью «моста» — корочки плотного, лишённого каких-либо несплошностей металла. Данный дефект вызван неравномерным охлаждением верхнего основания слитка после отключения источника обогрева. При этом поверхность слитка охлаждается быстрее, чем более глубокие слои металла, за счет лучистого теплообмена с внешней средой и тепловой центр температурного поля слитка перемещается с верхнего торца слитка в глубину. На уровне залегания теплового центра при окончательной кристаллизации слитка из-за кристаллизационного сжатия возникает усадочная полость (раковина) или рассеянная пористость.

Для изучения динамики процесса формирования усадочной раковины в рамках математической модели (1) были проведены расчеты залегания усадочной раковины в слитках при мгновенном отключении источника нагрева.

Нагрев верхнего торца слитка осуществлялся двумя аксиальными электронными пушками, энергия которых распределялась в виде концентрических кругов. Мощность первого луча W_1 равномерно распределялась в центральной области, а второго луча W_2 — на периферии со смещением на стенки мелкого водоохлаждаемого кристаллизатора 0,006 м.

При расчетах изменялась как величина общей мощности $W(W_1+W_2)$ электронно-лучевого нагрева, вкладываемой в кристаллизатор, так и мощность между пушками. Металл в кристаллизатор подавался порциями, скорость вытягивания слитка изменялась от 4 до 10 мм/мин.

В результате расчетов были получены поля температур в слитках различных диаметров (рис. 1) при квазистационарном режиме плавки и кристаллизации последней зоны твердо-жидкой фазы после выключения источника нагрева (рис. 3, а-в).

Расчеты показали (табл. 1), что увеличение общей мощности нагрева верхнего торца слитка, равно как и перераспределение мощности в сторону цен-

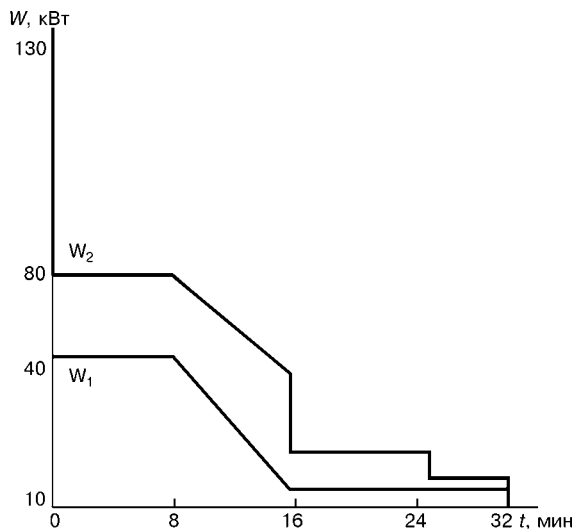


Рис. 4. Режим вывода усадочной раковины для слитка диаметром 630 мм сплава ЭП-975

Таблица 1. Параметры кристаллизации слитков жаропрочного сплава при ЭЛПЕ

Диаметр слитка, мм	Мощность нагрева, кВт		Глубина залегания усадочной раковины, мм	Время до полной кристаллизации, с
	W_1	W_2		
630	65	65	102... 110	900
850	140	70	107... 115	1050
1100	250	90	122... 135	1260

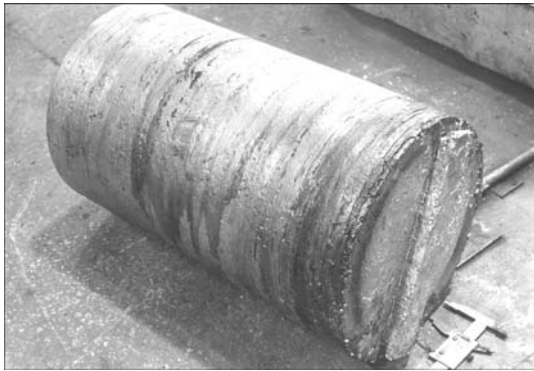


Рис. 5. Внешний вид слитка жаропрочного сплава ЭП-978 диаметром 630 мм

тральной зоны, влечет за собой увеличение времени полной кристаллизации слитка, а также глубины залегания усадочной раковины. При этом глубина залегания усадочной раковины в слитках диаметром 630... 1150 мм колебалась в пределах 100... 130 мм.

Процессы формирования усадочных раковин в слитках жаропрочных сплавов при выплавке в электронно-лучевых печах с промежуточной емкостью были также исследованы экспериментально. Исследования проводились для слитков круглого сечения диаметром 630 мм. Слитки выплавлялись по технологии ЭЛПЕ с горизонтальной подачей расходоуемой заготовки, накоплением металла в промежуточной емкости и его сливом в кристаллизатор с формированием там готового слитка. Высота порции жидкого металла, заливаемой в кристаллизатор, составляла 5... 6 мм. Нагрев верхнего торца слитка осуществлялся двумя электронными пушками. Мощность одной пушки при помощи спиральной развертки частотой 2,5 Гц равномерно распределялась по всей площади ванны жидкого металла в кристаллизаторе. Мощность второй пушки при помощи кольцевой развертки электронного луча шириной 30... 40 мм, частотой 0,6 Гц распределялась по периферийной зоне кристаллизатора.

Готовые слитки были тестированы с помощью ультразвукового контроля (УЗК). Исследования методом УЗК показали, что при мгновенном полном отключении источника нагрева усадочные раковины располагаются на глубине 100... 140 мм от верхнего торца слитка, имеют протяженность до 50 мм и как правило смещены от продольной оси на 30... 35 мм. Очевидно, что смещение усадочной раковины относительно продольной оси слитка обусловлено сливом жидкого металла с носка промежуточной емкости вдоль стенки кристаллизатора. Механическая обработка головных частей слитков подтвердила результаты УЗК.

Сравнение экспериментальных результатов с данными математического моделирования показало, что модель в целом реально отражает физическое явление формирования усадочной раковины в слитках. Рассчитанная глубина залегания усадочной раковины совпадает с измеренной в пределах 5... 10 %. Ошибка вычислений вызвана несимметричностью реального нагрева верхнего торца слитка. В целом модель отражает тенденцию изменения

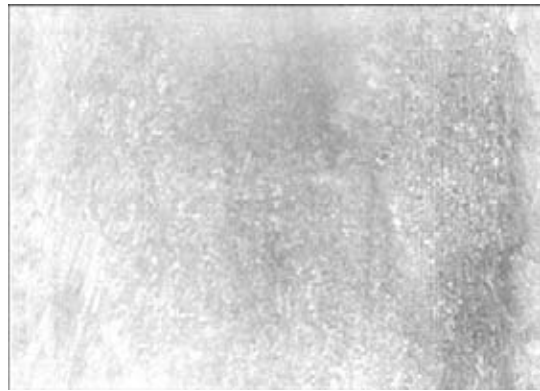


Рис. 6. Макроструктура слитка жаропрочного сплава ЭП-978 диаметром 630 мм

глубины залегания усадочной раковины с изменением диаметра слитка.

По результатам проведенных исследований были разработаны технологические режимы вывода усадочной раковины путем постепенного снижения мощности нагрева верхнего торца слитка (рис. 4), при которых тепловой центр выводится на поверхность слитка и усадочная раковина в готовом слитке отсутствует.

Весь процесс можно условно разделить на четыре периода. Первоначально подаваемая в кристаллизатор мощность не изменялась по сравнению с установленным режимом плавки, при этом поступление жидкого металла прекращалось. Тем самым предотвращалось быстрое охлаждение слитка, возникновение встречного фронта кристаллизации. Глубина ванны жидкого металла постепенно уменьшалась.

На втором этапе производили перераспределение мощности. Круговая развертка электронного луча одной из пушек заменялась на спиральную. Вследствие этого возрастала доля тепла, вкладываемого в осевую зону слитка. Третий и четвертый периоды — постепенное снижение тока лучей до нуля. В этом случае визуально наблюдали кристаллизацию поверхности слитка, направленную от периферии к центру. При достижении рабочими токами нулевой отметки кристаллизация заканчивалась.

Как показали экспериментальные плавки, технологические режимы вывода усадочной раковины, разработанные с помощью математических моделей тепловых процессов в слитках ЭЛПЕ, обеспечивают получение бездефектных слитков сложнолегированных жаропрочных сплавов на никелевой основе. Слитки имели удовлетворительную поверхность без каких-либо поверхностных дефектов (рис. 5).

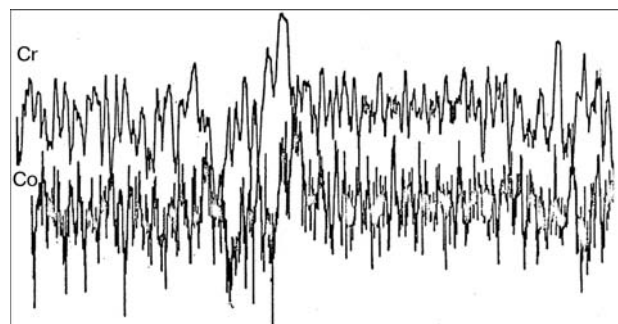


Рис. 7. Дендритная ликвация хрома и кобальта в слитках ВДП

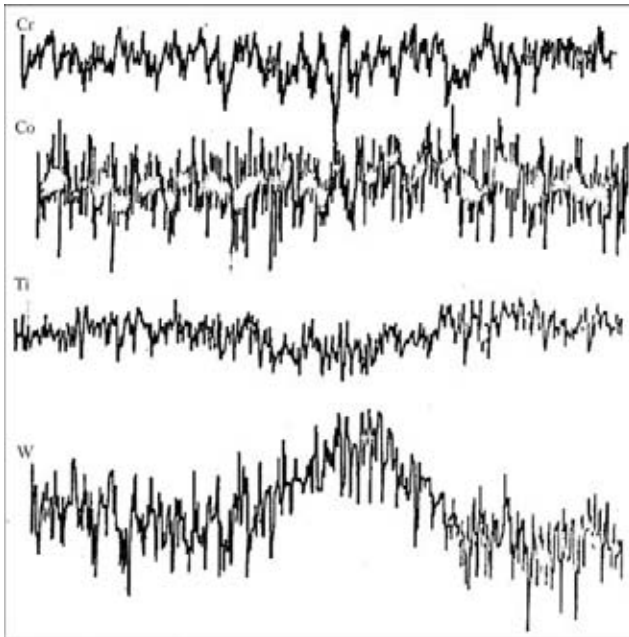


Рис. 8. Дендритная ликвация хрома, кобальта, титана и вольфрама в слитках ЭЛПЕ

Исследование макроструктуры слитков показало, что их кристаллическое строение характеризуется наличием двух зон — узкой краевой зоны мелких столбчатых кристаллов и зоны равноосных кристаллов размером 0,5... 2,0 мм, длиной 1... 2 мм, занимающих основную площадь исследованных темплетов (рис. 6).

Одним из важнейших показателей качества мелкозернистых слитков является дендритная структура, характеризующая степень ее дисперсности. Как известно, мерой дисперсности дендритной структуры служит расстояние между дендритными осями второго порядка. В отличие от слитков ВДП в слитках ЭЛПЕ благодаря порционной кристаллизации формируется дендритная структура более дисперсная. Оси дендритов и межосные промежутки имеют небольшую протяженность, причем различие между осями I и II порядка минимальное при переходе от края слитка к его оси.

Развитию дендритной ликвации в слитках способствует изменение растворимости компонентов сплава в процессе кристаллизации. Чем больше различие в растворимости компонентов в жидкой и твердой фазах, чем больше отличаются они по температуре плавления и чем выше скорость диффузии ликвирующего компонента, тем больше скорость ликвации.

Изучение дендритной ликвации слитков проводили методом микрорентгеноспектрального анализа на микроанализаторе «Камебакс». Степень ликвации оценивали по величине коэффициента ликвации, представляющего отношение максимальной концентрации элемента к минимальному в объеме дендрита. Степень ликвации положительная при содержании элемента в межосных участках в больших количествах (прямая ликвация) и отрицательная при его повышенном содержании в осях (обратная ликвация) (табл. 2).

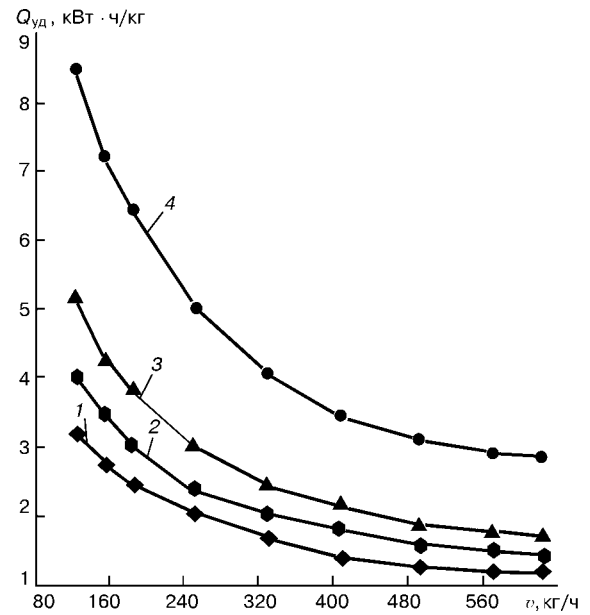


Рис. 9. Зависимость удельного расхода электроэнергии от скорости плавки: 1 — диаметр слитка 400 мм; 2 — 630 мм; 3 — 850 мм; 4 — 1100 мм

Как видно из таблицы, легирующие элементы никель, хром, железо в сплаве Инконель 718, а также кобальт и вольфрам в сплаве ЭП-975 имеют незначительную ликвацию или распределены равномерно. Следует отметить, что направление ликвации алюминия, титана, ниобия, молибдена — прямое, а вольфрама, кобальта, железа — обратное. Дендритная ликвация алюминия и молибдена незначительна. Наибольшую степень ликвации имеют ниобий и титан (особенно это проявляется в сплаве IN 718), которые входят в состав γ' -фазы и в состав эвтектики ($\gamma' - \gamma$).

Анализ распределения основных легирующих элементов по сечению дендритной ячейки слитков ВДП (рис. 7) и ЭЛПЕ (рис. 8) показал, что во втором случае благодаря порционной кристаллизации ликвация легирующих элементов менее выражена.

Наряду с исследованиями макро- и микроструктуры полученных слитков исследовалось влияние способа ЭЛПЕ с порционным сливом жидкого металла на химическую макро- и микронеоднородность слитков. В табл. 3 приведены результаты химического анализа исследованных слитков. Исходя из них, можно заключить, что практически все легирующие элементы равномерно распределены как в продольном, так и в поперечном направлениях. Следует также отметить, что происходит изменение химического состава, в особенности содержания хрома, в меньшей мере — алюминия и титана.

Таблица 2. Значения коэффициентов ликвации элементов

Марка сплава	Метод плавки	W	Mo	Co	Cr	Ti	Al	Nb	Fe	Ni
ЭП-975	ВДП	-1,18	-	-1,06	-1,14	1,65	-	1,31	-	-
	ЭЛПЕ	-1,14	-	-1,04	-1,09	1,02	-	1,04	-	-
IN 718	ВДП	-	1,3	-	-1,2	2,3	1,0	4,3	-1,3	1,02
	ЭЛПЕ	-	1,1	-	-1,2	2,2	0,8	2,2	-1,3	1,0



Таблица 3. Химический состав жаропрочных сплавов после ЭЛПЕ

Марка сплава	Содержание, %										
	C	W	Mo	Co	Cr	Ti	Al	Nb	Fe	Si	Mn
ЭИ 698:											
исходный	0,05	–	3,3	–	15,7	2,7	1,75	2,1	–	–	–
после ЭЛПЕ	0,047	–	3,4	–	15,5	2,6	1,6	2,2	–	–	–
ЭП-741:											
исходный	0,055	6,9	2,6	16,2	9,3	1,52	4,9	1,45	0,15	0,27	0,004
после ЭЛПЕ	0,055	6,8	2,7	16,4	8,9	1,6	4,86	1,55	0,15	0,3	Сл.
ЭП-975:											
исходный	–	7,0	1,2	11,7	7,5	2,7	4,0	1,7	–	–	0,5
после ЭЛПЕ	–	7,5	1,3	11,9	7,0	2,8	3,7	1,8	–	–	0,02
IN 718:											
исходный	–	–	3,0	–	17,4	0,85	0,5	5,1	18,5	–	–
после ЭЛПЕ	–	–	3,2	–	17,0	0,85	0,45	5,5	18,0	–	–

Исследование распределения основных легирующих элементов по сечению и высоте слитков показало полное отсутствие зональной ликвации. Результаты контроля химического состава металла свидетельствуют о том, что при оптимальных технологических параметрах содержание практически всех элементов находится в пределах требований технических условий.

Ввиду того, что при выплавке расходующихся электродов жаропрочных сплавов применяли исходные материалы, весьма чистые по примесям цветных металлов, их содержание в исследованных слитках не определялось.

Анализ содержания газов в слитках жаропрочных сплавов показал лишь незначительное снижение содержания азота и кислорода при переплаве по оптимальным технологическим режимам. При этом четкой зависимости содержания газов в литом металле от скорости плавки и диаметра выплавляемого слитка не обнаружено.

После ЭЛПЕ с порционным сливом жидкого металла происходит глубокое удаление водорода и его остаточное содержание составляет не более 0,0004... 0,0009 % вне зависимости от исходного в переплавляемой заготовке.

Результаты расчетов по математической модели (1) и экспериментальных плавков показали, что получение методом ЭЛПЕ химически и физически гомогенных, с плотной мелкокристаллической структурой слитков достигается при небольшом удельном расходе электроэнергии $Q_{уд}$ и незначительных потерях металла на испарение q . Эти показатели практически находятся на уровне показателей для прямого переплава заготовки в кристаллизатор с площадью поперечного сечения такой же, как в промежуточной емкости. При оптимальных параметрах технологического процесса удельный расход электроэнергии составляет 1,5... 2,5 кВт·ч/кг, а потери металла на испарение и разбрызгивание 1... 2 % (рис. 9, 10).

Таким образом, математическое моделирование тепловых процессов в слитке при его изготовлении электронно-лучевой плавкой с порционной кристаллизацией расплава позволило определить оптимальные значения технологических параметров

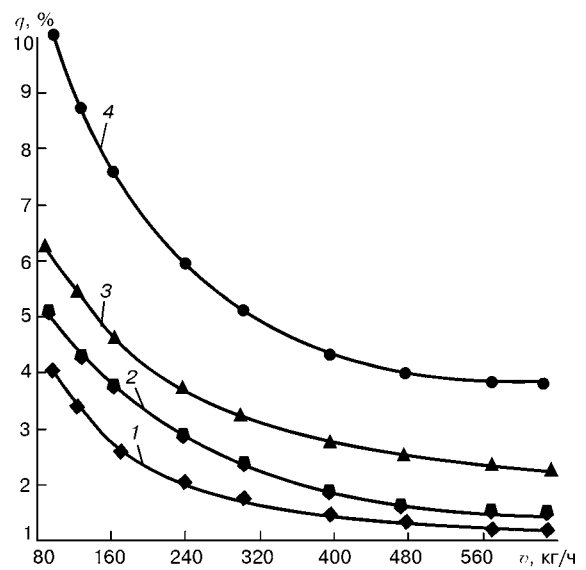


Рис. 10. Общие потери металла на испарение в зависимости от скорости плавки: 1 — диаметр слитка 400 мм; 2 — 630 мм; 3 — 850 мм; 4 — 1100 мм

процесса, гарантирующих получение качественных слитков жаропрочных никелевых сплавов с однородной мелкозернистой структурой. Исследование качества металла слитков, выплавленных на оптимальных технологических режимах из сплавов ЭП698, ЭИ741, ЭП975 и IN 718, подтвердило их высокую химическую и структурную однородность и более низкую ликвацию легирующих элементов по сравнению со слитками ВДП.

1. *Рафинирующие* переплавы стали и сплавов в вакууме / В. А. Бояршинов, Ал. Г. Шалимов, А. И. Щербаков и др. — М.: Металлургия, 1979. — 304 с.
2. *Коутс В. Г.* Деформация жаропрочных сплавов // Жаропрочные сплавы. — М.: Металлургия, 1976. — С. 354–383.
3. *Формирование* слитка при электронно-лучевом переплаве / Н. П. Тригуб, А. Я. Дереча, А. Л. Тихоновский, Д. А. Козлитин // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1985. — № 1. — С. 45–49.
4. *Электронно-лучевая* плавка / Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Козлитин Д. А. и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.

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

Поступила 16.12.2003