



УДК 669.117.56

ПОЛУЧЕНИЕ СПОСОБОМ ЭШП ЖМ РАЗНОРОДНОГО ПО ДЛИНЕ СЛИТКА БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ С МИНИМАЛЬНОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНОЙ

В. И. Махненко, Л. Б. Медовар,
С. С. Козлитина, Л. И. Дзюбак

Показана возможность путем непрерывного процесса электрошлаковой плавки в токоведущем кристаллизаторе с жидким присадочным металлом получать разнородные по высоте стальные слитки большого сечения с минимальной протяженностью переходной зоны в результате соответствующего управления глубиной жидкой металлической ванны слитка первого состава перед началом выплавки второй части слитка.

The feasibility is shown by using continuous process of electroslag melting in current-carrying mould with a molten filler metal to produce large-section steel ingots, heterogeneous in height, with a minimum length of transition zone using an appropriate control of depth of molten metal pool of ingot of the first composition before beginning of melting of the ingot second part.

Ключевые слова: разнородный по высоте слиток; управление глубиной жидкой металлической ванны; протяженность переходной зоны; управление подводимой мощностью

Развитие тяжелого машиностроения предъявляет все более сложные требования к заготовкам крупных элементов, в частности валам большого диаметра. Возникает необходимость в получении заготовок не просто большого сечения, а из соответствующих материалов с различными физическими свойствами как по сечению, так и по длине. Обычно проблему физической разнородности заготовки по ее длине решают с помощью сварки. Однако в случае заготовок большого сечения не всегда можно получить неразъемное соединение с применением сварки, поэтому поиск альтернативы сварной заготовке является актуальной задачей современного тяжелого машиностроения.

В данной работе рассматривается возможность применения способа ЭШП ЖМ с токоведущим кристаллизатором и жидким присадочным материалом при получении разнородного по высоте (длине) слитка круглого сечения путем соответствующей смены жидкого присадочного материала. Такая идея относительно легко реализуется для слитков небольшого поперечного сечения. При больших поперечных сечениях и соответственно больших глубинах жидкой ванны только за счет смены состава присадочного металла качественную заготовку получить очень трудно в случае, если физические свойства, определяющие разнородность слитка по высоте, отличаются существенно. Большая глубина

жидкой ванны обуславливает большую протяженность переходной зоны, что не всегда устраивает разработчика соответствующей техники.

В этой связи очень важно перед сменой присадочного металла иметь в выплавленной части слитка довольно мелкую жидкую ванну по всему поперечному сечению, что обеспечит качественное соединение (сплавление) разнородных частей слитка и небольшим протяженностью переходной зоны. Таким образом, перед сменой присадочного металла главной задачей является получение по всему поперечному сечению слоя жидкого металла в заданных пределах по глубине.

Предлагается после достижения необходимой высоты слитка $H_c^{(1)}$ прекращать подачу присадочного металла и, меняя соответствующим образом во времени подводимую мощность W в шлаке, снижать глубину металлической ванны.

Для количественного описания этой процедуры использовали метод математического моделирования поля электрического потенциала $U(r, z)$ в шлаке и, соответственно, поля тепловыделений $W(r, z)$ в шлаке с использованием зависимости

$$W(r, z, t) = \sigma(r, z, t) \left[\left(\frac{\partial U(r, z)}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial U(r, z)}{\partial z} \right)^2 \right],$$

где $\sigma(r, z, t)$ — электропроводимость шлака в зависимости от температуры в точке r, z в момент времени t .



Зависимость проводимости шлака от температуры следующая:

$T, ^\circ\text{C}$	1500	1640	1675	1712	1750
$\sigma, 1/\text{Ом}\cdot\text{см}$	2,08	2,30	2,46	2,64	2,88

Распределение потенциала $U(r, z)$ (рис. 1) вычисляется для шлаковой ванны с помощью дифференциального уравнения, приведенного в работе [1],

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \sigma \frac{\partial U}{\partial r} \right) + r \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0$$

при $z = 0 \quad \frac{\partial U}{\partial z} = 0$, при $r = 0 \quad \frac{\partial U}{\partial r} = 0$;

в пределах поз. 5 $U = U_0$;

в пределах поз. 6 $\frac{\partial U}{\partial r} = 0$;

в пределах поз. 7 $U = U_{\text{шл}}$;

на границе шлак–металл $U = 0$ (рис. 2).

Значение $U_{\text{шл}}$ определяют из условия баланса электрического тока на контуре шлаковой ванны, т. е.

$$\oint \sigma \frac{\partial U}{\partial r} = 0.$$

При решении задачи нестационарной теплопроводности на основе тепловыделений в шлаковой ванне и отвода тепла в кристаллизатор и окружающую среду с поверхностей шлаковой ванны, а также слитка в кристаллизатор определялось нестационарное температурное поле в шлаке и слитке при допущении, что слиток наращивается жидким металлом по высоте (оси z) начиная с поддона со скоростью v .

Теплофизические свойства материала слитка в зависимости от температуры следующие:

$T, ^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$\lambda, \text{Вт}/\text{см}\cdot^\circ\text{C}$	0,11	0,12	0,14	0,15	0,17	0,19	0,20	0,23	0,24	0,25
$c_{\text{ж}}, \text{Дж}/\text{см}^3\cdot^\circ\text{C}$	5,11	5,19	5,30	5,46	5,72	6,11	6,41	6,29	6,49	6,70

При $T > 1460 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\lambda = 0,83 \text{ Вт}/\text{см}\cdot^\circ\text{C}$, а при $1460 > T > 1400 \text{ } ^\circ\text{C}$ $c_{\text{ж}} = 27,07 \text{ Дж}/\text{см}^3\cdot^\circ\text{C}$. Для жидкого шлака $\lambda_{\text{шл}} = 1,0 \text{ Вт}/\text{см}\cdot^\circ\text{C}$, $c_{\text{шл}} = 6,75 \text{ Дж}/\text{см}^3\cdot^\circ\text{C}$.

Поскольку математическое описание указанной модели неоднократно применяли в работах [1, 2], то сразу приведем характерные результаты, связанные с получением стального слитка диаметром 1200 мм со скоростью $v = 6 \text{ мм}/\text{мин}$ при температуре заливаемого металла $T_0 = 1550 \text{ } ^\circ\text{C}$. На рис. 3 приведены данные относительно температурного поля в слитке и шлаке в момент времени $t = 2,75 \text{ ч}$ от начала плавки, когда высота выплавленного слитка соответствует 1000 мм для первой части заготовки из стали I с химическим составом, указанным в табл. 1.

Вторая часть слитка по химическому составу должна соответствовать стали II (табл. 1). Однако

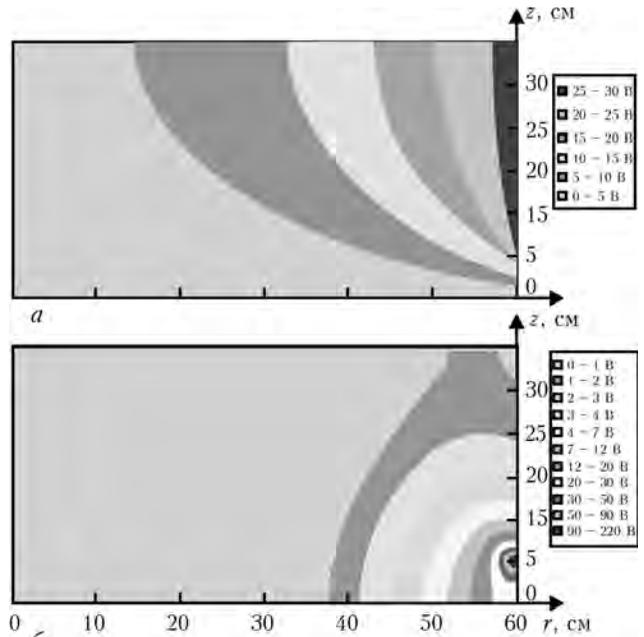


Рис. 1. Характерное распределение в шлаковой ванне при выплавке слитка диаметром 1200 мм электрического потенциала U (а) и тепловыделений W (б)

для упомянутого момента времени смена заливаемого металла при глубине жидкой металлической ванны примерно 700 мм из стали I приводит к большой протяженности переходной зоны, что неприемлемо во многих случаях.

В этой связи, рассматривали возможность сокращения глубины металлической ванны, продолжая процесс нагрева–охлаждения слитка при скорости $v = 0$ (рис. 3).

Управление параметрами жидкой металлической ванны на этой стадии производили путем варьирования во времени подводимой мощности W_0 . Если на первой стадии $W_0 = 824 \text{ кВт}$ при $U_0 = 27 \text{ В}$, то на стадии уменьшения глубины металлической ванны перед началом выплавки второй части слитка

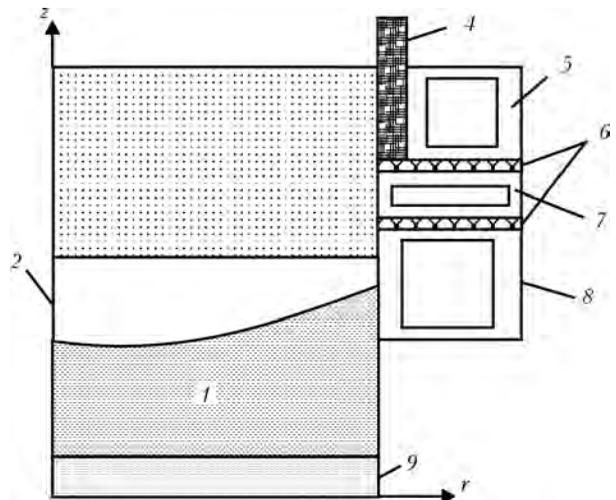


Рис. 2. Схема плавки ЭШП в токоведущем кристаллизаторе: 1 – слиток; 2 – металлическая ванна; 3 – шлак; 4 – графитовая футеровка; 5 – токоведущий кристаллизатор под напряжением U ; 6 – изолятор; 7 – кристаллизатор, шунтирующий шлаковую ванну; 8 – кристаллизатор; 9 – поддон

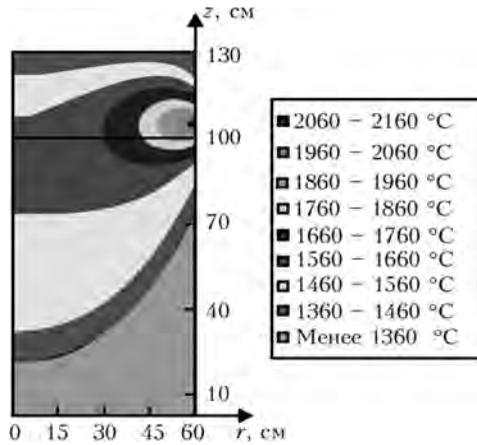


Рис. 3. Изотермы в сечении (z, r) в слитке диаметром 1200 мм после 2,75 ч плавки в токоведущем кристаллизаторе со скоростью 0,1 см/с; эффективная мощность $W_0 = 824$ кВт, напряжение 27 В

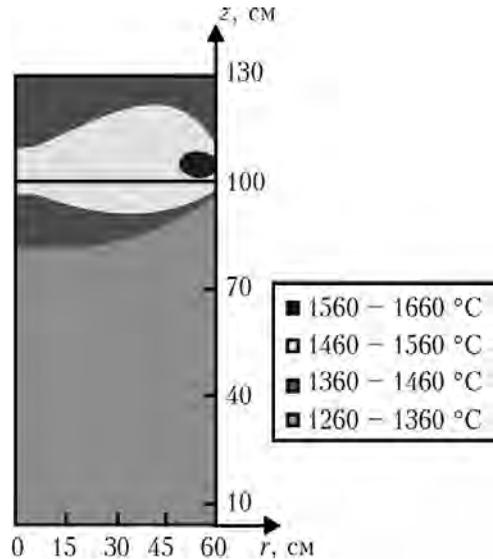


Рис.5. Изотермы в сечении (z, r) в слитке диаметром 1200 мм после 23 ч активного (управляемого) охлаждения

из стали II эта мощность изменялась во времени от $0,5W_0$ до $1,2W_0$.

На рис. 4 приведен график изменения мощности W во времени, полученный в результате численных экспериментов при управлении геометрическими параметрами положения изотермы 1460 °C (температура плавления), соответствующей границе жидкой металлической ванны.

Параметр H_1 соответствует глубине жидкой металлической ванны по центру слитка при $r = 0$, H_2 — то же у поверхности контакта с кристаллизатором, H — положение изотермы $T_{пл}$ в шлаковой ванне на оси слитка. На рис. 4 приведена кинетика изменения этих параметров во времени при выдержке слитка на стадии подготовки к заливке стали II 23 ч. На рис. 5 показана металлическая ванна после 23 ч длительности этой стадии. Видно, что по сравнению с данными, приведенными на рис. 3, размеры жидкой металлической ванны резко уменьшились за счет довольно значительных энергетических затрат — примерно 18200 кВт·ч, что приблизительно в 8 раз выше, чем на первой стадии, однако по сравнению с затратами на стыковку способами электрошлаковой сварки либо контактной оплавлением указанные энергетические затраты сопоставимы, но при этом не требуется для соединения слитков смены мощного оборудования. На рис. 5 показано изменение размера переходной зоны для полученной жидкой металлической ванны с химическим содержанием стали I при возобновлении процесса выплавки

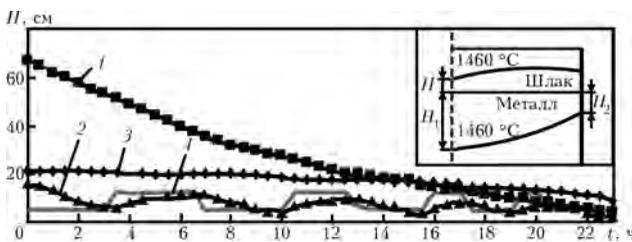


Рис. 4. Управление размерами жидкой металлической ванны в слитке диаметром 1200 мм за счет изменения $W(t)$ при нулевой подаче жидкого металла ($W_0 = 824$ кВт, напряжение 27 В): 1 — H_1 ; 2 — H_2 ; 3 — H ; 4 — W

для стали II на прежних режимах, т. е. при $v = 6$ мм/мин, $W_0 = 824$ кВт.

В общем случае, если известны химический состав $X(t)$ жидкой металлической ванны объемом $G(t)$ в момент времени t и объемная скорость вне-сечения жидкого металла $\frac{\pi D^2}{4}v(t)$ с химическим составом X_{III} , то за промежуток времени Δt химический состав жидкой металлической ванны $X(t + \Delta t)$ определяется зависимостью

$$X(t + \Delta t) = \frac{X(t + \Delta t)[2G(t) - G(t + \Delta t)] + X_{III}(t)\frac{\pi D^2}{4}v(t)\Delta t}{2G(t) - G(t + \Delta t) + \frac{\pi D^2}{4}v(t)\Delta t} \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что по мере развития процесса выплавки слитка состава X_I за счет разбавления предыдущего состава ванны составом X_{III} можно регулировать состав жидкой металлической ванны. Естественно, что состав X_{II} , отличающийся от эффективного состава X_{III} , будет иметь довольно протяженную переходную зону. Жидкая металлическая ванна на рис. 5 имеет объем $G_H = 71200$ см³. Как показано на рис. 6, ее объем со времени начала процесса формирования переходной зоны t_H меняется по закону

$$G(t) = G_H + \pi \frac{D^2}{4}v\tau, \quad (2)$$

где $\tau = t - t_H$ при $\tau < 30$ мин.

С учетом уравнений (1) из (2) получим зависимость для эффективного состава X_{III} при переходе от X_I к X_{II} :

$$X_{III} = X_{II} + \frac{4G_H}{\pi D^2 v \tau} (X_{II} - X_I). \quad (3)$$

Пример. Требуется получить вал диаметром 1200 мм из двух сталей:

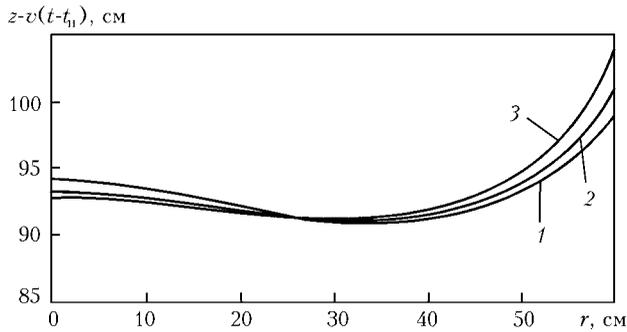


Рис. 6. Изменение зоны проплавления слитка из стали I в течение времени τ от начала подачи материала из стали II: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30 мин

Сталь I: 0,15 C; 0,50 Si; 0,40 Mn; 0 Ni; 9 Cr; 1,0 Mo;
 Сталь II: 0,40 C; 0,20 Si; 0,70 Mn; 2,0 Ni; 0,8 Cr;
 0,2 Mo.

В табл. 1 приведены результаты расчета по формуле (3) X_{III} для варианта плавки, когда химический состав I соответствует X_I , а стали II – X_{II} в различные моменты времени $\tau = t - t_n$ и, наоборот, состав стали II соответствует X_I , а состав стали I – X_{II} . Там же даны результаты расчета химического состава жидкой металлической ванны по выражению (1) до момента $t_n + \tau$ (шаг прослеживания $\Delta t = 50$ с).

Из результатов, приведенных в табл. 1, следует, что вариант X_I –сталь II более рационален с позиций уменьшения значения $v\tau$ при достижении в момент $t_n + \tau$ состава жидкой ванны, близкой к X_{II} данной последовательности.

Из табл. 1 видно, что удовлетворительная близость состава жидкой ванны к составу X_{II} достигается за $v\tau = 0,6 \cdot 20 = 12$ см, в то время как для

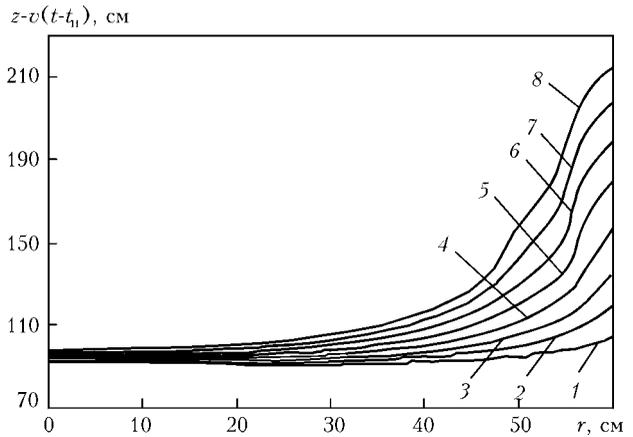


Рис. 7. Изотермы 1460 °C или донная часть жидкой металлической ванны в моменты времени t от начала четвертого этапа выплавки слитка, где номера n кривых 1–8 определяют время $t = 0,5n$ ч

варианта X_I –сталь I даже при $v\tau = 24$ см расхождения по хром с X_{II} весьма существенные.

Таким образом, получение разнородного по длине стального слитка большого сечения с умеренной протяженностью переходной зоны способом ЭШП ЖМ в токоведущем кристаллизаторе и жидким присадочным металлом в общем случае рационально проводить непрерывно в четыре этапа:

- первый – выплавка первой части слитка составом X_I ($0 < t \leq t_n^{(1)}$);
- второй – уменьшение размеров жидкой ванны при $v = 0$ и переменной мощности W_0 ($t_n^{(1)} < t < t_n$);
- третий – формирование переходной зоны за счет присадки состава X_{III} ($t_n < t < t_n + \tau$);
- четвертый – выплавка второй части слитка ($t_n + \tau < t \leq t_n^{(2)}$).

Таблица 1. Результаты расчета для X_I (сталь I), X_{II} (сталь II) составов присадки X_{III} и жидкой металлической ванны при различных значениях τ , мин

Элемент	$X_I, \%$	$X_{II}, \%$	10		20		30		40	
			X_{III}	$X_{(t_n + \tau)}$						
X_I (сталь I) и X_{II} (сталь II)										
C	0,15	0,40	0,66	0,40	0,53	0,41	0,49	0,41	0,47	0,40
Si	0,50	0,20	0	0,25	0,04	0,19	0,95	0,19	0,12	0,19
Mn	0,40	0,70	1,01	0,71	0,86	0,71	0,80	0,71	0,78	0,71
Ni	0	2,0	4,10	2,08	3,05	2,06	2,70	2,05	2,53	2,04
Cr	9,0	0,8	0	4,44	0	2,04	0	2,18	0	1,72
Mo	1,0	0,2	0	0,49	0	0,33	0	0,24	0	0,19
X_I (сталь II) и X_{II} (сталь I)										
C	0,40	0,15	0	0,23	0,02	0,17	0,06	0,14	–	–
Si	0,20	0,50	0,81	0,41	0,86	0,47	0,69	0,51	–	–
Mn	0,70	0,40	0,08	0,49	0,24	0,43	0,29	0,39	–	–
Ni	2,00	0	0	0,99	0	0,65	0	0,48	–	–
Cr	0,80	9,0	17,62	6,40	13,31	8,26	11,87	9,20	–	–
Mo	0,20	1,0	1,84	0,75	1,42	0,93	1,28	1,02	–	–



Таблица 2. Средний химический состав жидкой ванны или кристаллизующегося объема для момента времени $t = 0,5n$ ч для вариантов последовательности выплавки сталь I–сталь II

Элемент	Номер варианта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Сталь I–сталь II								
C	0,389399	0,391633	0,394996	0,396517	0,397381	0,397942	0,398335	0,398623
Si	0,212719	0,210038	0,206002	0,204177	0,203140	0,202467	0,201996	0,201631
Mn	0,687279	0,689959	0,693995	0,695819	0,696857	0,697530	0,698001	0,698347
Ni	1,915201	1,933071	1,959978	1,972141	1,979057	1,983545	1,986684	1,988986
Cr	2,175978	1,886010	1,449402	1,252038	1,139806	1,066994	1,016061	0,978704
Mo	0,241775	0,232971	0,219715	0,213723	0,210316	0,208105	0,206559	0,205425
Сталь II–сталь I								
C	0,143984	0,146705	0,147796	0,148379	0,148741	0,148987	0,149163	0,149295
Si	0,507217	0,503951	0,502643	0,501943	0,501509	0,501215	0,501003	0,500845
Mn	0,392781	0,396046	0,397355	0,398056	0,398490	0,398784	0,398996	0,399154
Ni	0,483550	0,264787	0,177151	0,130214	0,101121	0,081408	0,067236	0,056633
Cr	9,197284	9,108030	9,072276	9,053126	9,041256	9,033213	9,027431	9,023105
Mo	1,019247	1,010539	1,007051	1,005182	1,004024	1,003240	1,002676	1,002254

При этом первый и четвертый этапы реализуются на стандартных режимах процесса ЭШП однодольного слитка.

Для второго этапа необходимы численные эксперименты на стадии разработки и экспериментального контроля глубины жидкой металлической ванны при реализации.

На третьем этапе требуются относительно простые расчеты на стадии проектирования технологии с учетом металлургических (металловедческих) проблем, связанных с составом переходной зоны при достаточно низких скоростях охлаждения.

На рис. 7 и в табл. 2 приведены результаты моделирования четвертого этапа выплавки слитка при двух последовательностях ведения процесса в соответствии с табл. 1. Из данных рис. 7 видно, что переходная зона наиболее существенно проявляется в поверхностных слоях слитка, поскольку тепловой режим выплавки на этом этапе при сохранении энергетических параметров первого этапа приводит к увеличению глубины жидкой металлической ванны по сравнению с таковой при эквивалентных моментах времени выплавки первой части слитка. Если к концу первого этапа $t_n = 2,75$ ч, $H_2 \approx 25$ см и $H_1 \approx 70$ см, то в эквивалентный момент четвертого этапа (кривая 5, рис. 7) соответственно $H_2 \approx 28$ см и $H_1 \approx 100$ см при положении зеркала металлической ванны $z = 198$ см, что обусловлено избыточным энергетическим режимом плавки для рассматриваемого примера.

Выводы

1. Показана возможность путем непрерывного процесса ЭШП ЖМ в токоведущем кристаллизаторе с

жидким присадочным материалом получать разнородный по высоте стальной слиток большого сечения с минимальной протяженностью переходной зоны.

2. Разработан алгоритм снижения глубины жидкой ванны путем периодического изменения подводимой к шлаковой ванне электрической мощности и скорости подачи жидкого металла. На примере стального слитка диаметром 1200 мм показано, что такое управление позволяет исходную жидкую ванну глубиной около 700 мм свести к ванне с глубиной примерно 100 мм, достаточно одинаковой по радиусу.

3. Предлагаемое изменение глубины металлической ванны связано с достаточно высокими затратами электрической энергии, сопоставимой с ЭШС слитков соответствующего сечения, но при этом не требуется смена мощного оборудования.

4. Показано, что протяженность переходной зоны существенно меняется по радиусу слитка. В центре она минимальная, а у стенки кристаллизатора ее протяженность возрастает.

5. Рассмотренный алгоритм управления глубиной жидкой металлической ванны при ЭШП ЖМ можно использовать на стадиях окончания процесса для оптимизации размеров усадочной раковины.

1. *Тепловые процессы при ЭШП* / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, Г. С. Маринский и др. — Киев: Наук. думка, 1978. — 303 с.
2. *Исследование параметров электрошлаковой плавки в токоведущем кристаллизаторе* / Ю. М. Кусков, В. И. Ус, С. В. Томиленко и др. // Пробл. спецэлектротехнологии. — 1995. — № 3. — С. 24–28.

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

Поступила 30.01.2012