



УДК 669.187.56.001.1

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УКРУПНЕНИЯ СЛИТКОВ ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

В. И. Махненко, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко,  
Т. В. Королева, А. А. Полишко

Представлены результаты математического моделирования процессов укрупнения слитков из высоколегированных сталей и сплавов, чувствительных к сегрегации, путем последовательной электрошлаковой наплавки жидким металлом (ЭШН ЖМ) в токоподводящем кристаллизаторе. Определены характерные параметры двухфазной зоны модельных слитков диаметрами 350; 520 и 690 мм, полученных путем последовательной наплавки по схеме вытяжки способом ЭШН ЖМ слоев металла из сплава Инконель 718 на исходный центральный слиток диаметром 180 мм из этого же сплава, свидетельствующие о перспективности нового процесса ЭШН ЖМ укрупнения слитков из высоколегированных сталей и сплавов, чувствительных к сегрегации.

Results of mathematical modeling of the processes of enlargement of ingots of high-alloy steels and alloys, susceptible to segregation, by a successive electroslag cladding using a liquid metal (ESC LM) in a current-carrying mould are given. Typical parameters are determined of two-phase zone of model ingots of diameters 350, 520 and 690 mm, produced by a successive cladding by a scheme of withdrawal by the ESC LM of metal layers of Inconel 718 alloy on initial central ingot of 180 mm diameter of the same alloy, proving the prospects of the new process of ESC LM for enlargement of ingots of high-alloy steels and alloys, susceptible to segregation.

**Ключевые слова:** высоколегированные стали и сплавы; сегрегация; укрупнение слитков Инконель 718ЭШП; электрошлаковая наплавка жидким металлом; токоподводящий кристаллизатор; пятнистая ликвация; градиент температуры; двухфазная зона; максимальный размер карбидов; расстояние между осями вторичных карбидов

**Введение.** Обеспечение высокого качества крупных стальных изделий традиционно связано с обеспечением однородности структуры и химического состава исходных поковок и требуемой степени укова для исправления дефектов слитков (сегрегации и пористости). Требования к качеству поковок в значительной мере зависят от их химического состава и области применения.

Одной из проблем современной энергетики при изготовлении низких ступеней газовых турбин является получение деталей с высокими эксплуатационными свойствами, например дисков большого

диаметра для компрессоров. Для деталей такого назначения используют жаропрочные суперсплавы на никелевой основе.

Наиболее часто для изготовления дисков применяют поковки из сплава Инконель 718, склонного к пятнистой ликвации и образованию дефектов типа фрекелс, не устранимых при деформации и термической обработке. Наличие последних существенно ограничивает возможность получения заготовок для производства дисков большого диаметра путем осадки слитка до заготовки диаметром  $D_3 = nD_0$ , где  $n > 3$  [1]. Для их изготовления используют разнообразные способы переплава, включающие как двойной ВИП + ЭШП или ВИП + ВДП, так и тройной ВИП + ЭШП + ВДП передела. Применение традиционных переплавных процессов также не способствует решению проблем изготовления

© В. И. МАХНЕНКО, Л. Б. МЕДОВАР, В. Я. САЕНКО, Т. В. КОРОЛЕВА, А. А. ПОЛИШКО, 2008

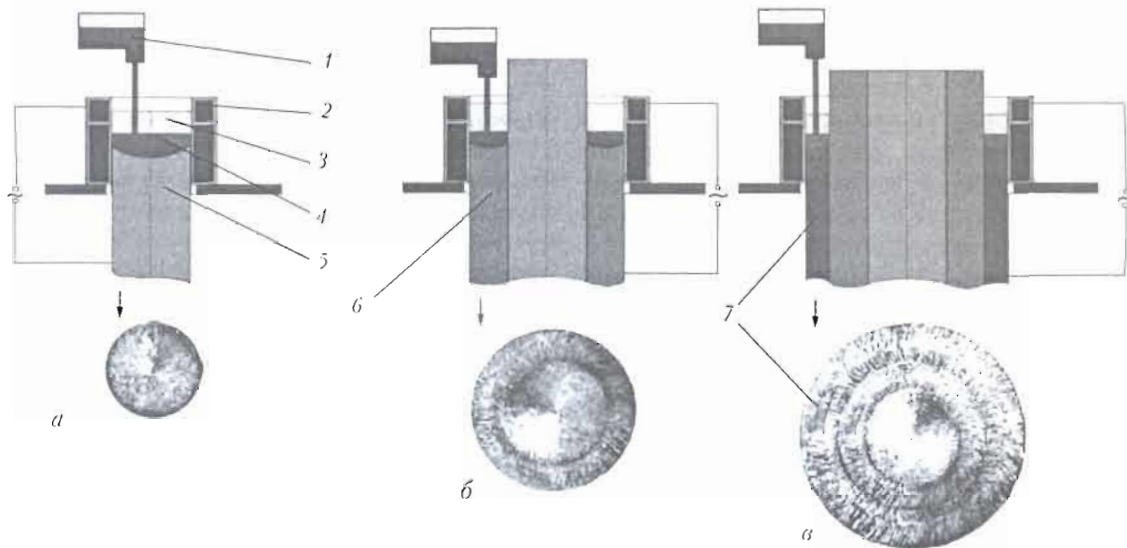


Рис. 1. Схема укрупнения слитков способом ЭШН ЖМ в токоподводящем кристаллизаторе (верхний ряд) и схематическое изображение поперечного сечения исходного слитка (а), после одно- (б) и двукратной (в) ЭШН: 1 — заливочное устройство для подачи жидкого металла в кристаллизатор; 2 — токоподводящий кристаллизатор; 3 — шлаковая ванна; 4 — металлическая ванна; 5 — центральный слиток; 6 — слой металла после однократной наплавки; 7 — металл второго слоя наплавки.

крупных слитков из сплавов на никелевой основе при увеличении их диаметра в случае ВДП более 1000 мм, существующих схем ЭШП более 700 мм [2].

Принципиально новые возможности при производстве крупных кузнечных слитков для поковок роторов и дисков мощных современных паровых и газовых турбин из высоколегированных сталей и сплавов, а также другой крупнотоннажной машиностроительной продукции открывает разработанный в ИЭС новый технологический процесс получения сверхкрупных стальных слитков способом ЭШН ЖМ [3, 4], базирующийся на одно- или многократной кольцевой электрошлаковой наплавке на центральный слиток металла аналогичного химического состава и обеспечении однородной структуры в наплавленном слитке (рис. 1).

Процесс ЭШН ЖМ включает установление вертикально центрального слитка с заданным зазором в охватывающий его короткий токоподводящий кристаллизатор, ограничение зазора снизу с помощью кольцевого поддона с затравкой. В процессе ЭШН ЖМ при относительном встречном перемещении слитка и кристаллизатора путем частичного оплавления центрального слитка с применением короткого токоподводящего кристаллизатора и жидкого металла, подаваемого в плавильное пространство, формируется слиток, диаметр которого больше диаметра исходного центрального слитка на значение, равное удвоенному заданному зазору.

При применении процесса ЭШН ЖМ объем металлической ванны значительно меньше, чем у слитка аналогичного диаметра, выплавленного по канонической схеме ЭШП, а протяженность двухфазной зоны твердожидкого состояния при затвердевании наплавливаемых слоев металла существенно меньше, чем у обычных слитков ЭШП. Кроме того, центральный слиток при последовательной ЭШН каждого слоя играет роль макрохолодильника, отбира-

ющего тепло и положительно влияющего на форму металлической ванны и структуру наплавляемого металла. В результате создаются благоприятные условия для получения крупных слитков ЭШН ЖМ, свободных от пятнистой ликвации, практически любого заданного сечения.

Естественно, что для промышленной реализации важен выбор рациональных параметров процесса: толщины наплавляемого  $i$ -го слоя  $H_i$ , вертикальной

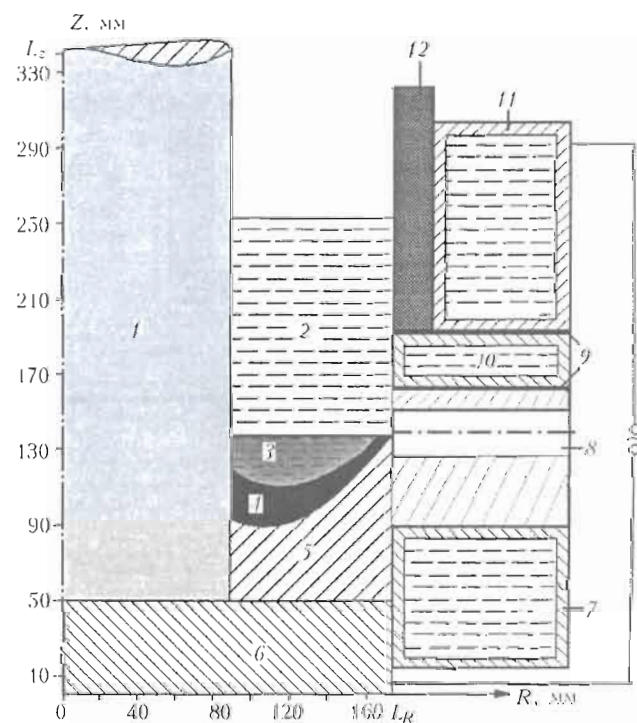


Рис. 2. Принятая схема для моделирования процесса ЭШН: 1 — центральная заготовка, подвергаемая наплавке; 2 — ванна жидкого шлака; 3 — металлическая ванна; 4 — двухфазная зона; 5 — наплавленный слой; 6 — затравка; 7, 10 — водоохлаждаемые секции; 8 — канал датчика уровня металлической ванны; 9 — изолятор; 11 — токоподводящая секция кристаллизатора; 12 — графитовая футеровка.



скорости процесса для каждого слоя  $v_i$ , высоты шлаковой ванны  $h_{ш}$ , размеров токоведущего кристаллизатора (рис. 2) и соответствующих энергетических параметров от источника питания (напряжение  $U$  и ток  $I$ ), которые меняются во времени. Получение таких данных экспериментальным путем требует больших затрат, особенно с учетом стоимости материала и электрической энергии.

Заслуживает внимания применение математического моделирования для получения важной информации относительно рациональных параметров рассматриваемого процесса ЭШН ЖМ в производстве слитков большого диаметра из высоколегированных сталей и сплавов.

За прошедшие годы развитие вычислительной техники существенно расширило возможности математического моделирования различных процессов получения слитков на основе ЭШП [5-9], которые авторы статьи использовали при проведении настоящих исследований.

**Математическая модель процесса.** Математическая модель процесса ЭШН ЖМ состоит из нескольких задач, математическая формулировка которых соответствует следующим характерным физическим явлениям, связанным друг с другом [7]:

определение поля электрического потенциала в жидкой шлаковой ванне и соответствующего тепловыделения;

расчет температурного поля в шлаковой и металлической ваннах с учетом порционного поступления жидкого присадочного металла;

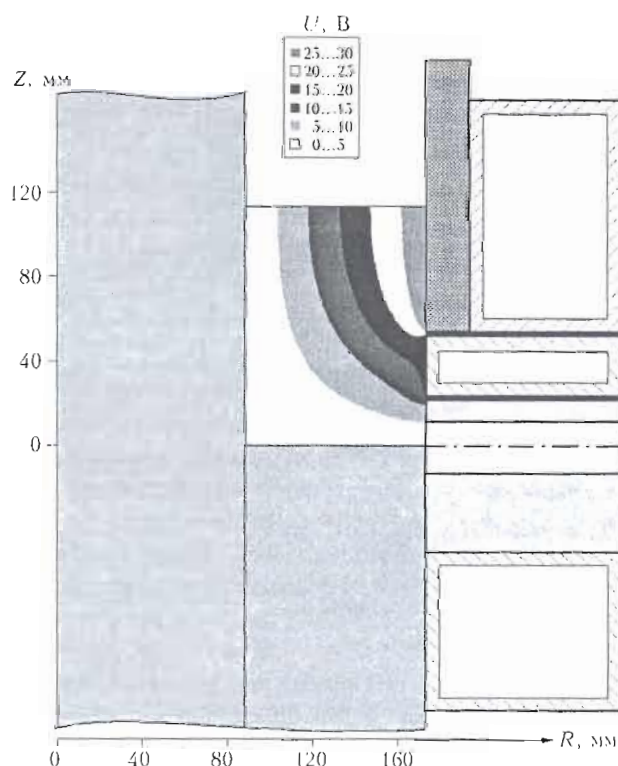


Рис. 3. Распределение потенциала  $U(r,z)$  в области шлаковой ванны

определение параметров двухфазной зоны, на основе которых можно, согласно работам [9-11], судить о степени неблагоприятного проявления ликвационных процессов в слитке.

*Электрический потенциал и тепловыделение в шлаковой ванне.* Распределение электрического потенциала  $P(r,z,t)$  в шлаковой ванне определяли при допущении осевой симметрии области решения и при заданной разности потенциалов между внутренней поверхностью графитовой футеровки 7 (рис. 2) и металлической ванной 4, а также наплавляемой поверхностью заготовки 1. При этом потенциал на поверхностях 4 и 1 равнялся 0, а распределение электрического потенциала в шлаковой ванне определяли в результате решения дифференциального уравнения

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r}{\rho(T)} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{r}{\rho(T)} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0$$

при граничных условиях:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0 \text{ на поверхности шлаковой ванны;}$$

$P = 0$  на границе с металлической ванной а также на границе с металлической заготовкой;

$$P = V_0 \text{ на графитовой футеровке 7;}$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0 \text{ на внутренней поверхности секции 10,}$$

которая шунтирует потенциал в этой зоне;

$$\frac{\partial P}{\partial r} = 0 \text{ на изоляторах кристаллизатора 5.}$$

Здесь  $\rho(T,t)$  — удельное электрическое сопротивление шлака, зависящее от  $T(r,z,t)$  — температуры в точке  $(r,z)$  в момент времени  $t$ . Величина  $1/\rho(T,t)$  — проводимость шлака — зависит от химического состава шлака и меняется в зависимости от температуры. В расчетах использованы данные для флюса АНФ-6. Зависимость проводимости  $1/\rho$  шлака от температуры следующая:

Температура, °С	1590	1640	1675	1712	1750
Проводимость, 1/ом·см	2,08	2,30	2,46	2,64	2,88

На рис. 3 представлены результаты расчета распределения потенциала  $P(r,z)$  в шлаковой ванне при разности потенциалов 29 В между внутренней поверхностью графитовой футеровки 7 и поверхностями 1, 4 для случая наплавки слоя толщиной 85 мм на заготовку диаметром 180 мм. Уровень тока  $I$  определяли расчетным путем, и для данного случая он равен 7000 А.

Тепловыделение в шлаковой ванне для точки  $(r,z)$  в момент времени  $t$  определяется по следующей формуле:

$$W(r,z,t) = \frac{1}{\rho(T)} \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 \right], U = Pk.$$

На рис. 4 приведено типичное распределение функции  $W(r,z,t)$ , соответствующее полю потенци-



ала, показанному на рис. 3, при температуре шлака 1600 °С в момент его заливки. Видно, что основное количество тепла концентрируется в зоне токоведущей секции кристаллизатора, обеспечивая формирование поверхности слитка.

**Определение температурных полей.** Температурное поле  $T(r, z, t)$  для области заготовки, шлака и наплавленного слоя определяется в результате решения дифференциального уравнения

$$\frac{\partial}{\partial r}(r\lambda \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(r\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{r}{\rho(T)} \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial r} \right)^2 \right] = r\gamma \frac{\partial T}{\partial t}$$

при следующих условиях:

$$t = 0, T = T(r, z);$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{ для } r = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_l (T - T_{cp})$$

для  $z = 0, z = L_z$ ;

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \left\{ \alpha_{возл} + \left[ (T_{ш} + T_{cp}) (T_{ш}^2 + T_{cp}^2) \right] A \right\} (T - T_{cp})$$

для  $z = L_{ш}$ , т. е. для поверхности шлаковой ванны;

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{r=L_r} = \left\{ \alpha_{возл} + \left[ (T_c + T_{cp}) (T_c^2 + T_{cp}^2) \right] A \right\} (T - T_{cp})$$

для свободной поверхности слитка ниже кристаллизатора;

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{r=L_r} = \frac{\alpha_{ш}}{1 + \frac{\alpha_{ш} \delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\alpha_{ш} \delta_{гф}}{\lambda_{гф}}} (T - T_{ш})$$

для токоведущей части кристаллизатора;

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{r=L_r} = \frac{\alpha_{ш}}{1 + \frac{\alpha_{ш} \delta_{ст}}{\lambda_{ст}}} (T - T_{ш})$$

для формирующей части кристаллизатора.

В приведенных формулах используются следующие обозначения:

$\lambda(T)$  — коэффициент теплопроводности материала в точке  $(r, z)$ ;

$\gamma(T)$  — объемная теплоемкость материала в точке  $(r, z)$ ;

$\alpha_l$  — коэффициент теплообмена между затравкой и воздухом с температурой  $T_{cp}$ ;

$\alpha_{ш}$  — коэффициент теплообмена между поверхностью слитка и водоохлаждающей секцией кристаллизатора с температурой  $T_{ш}$ ;

$\alpha_{возл}$  — коэффициент теплообмена с окружающим воздухом с температурой  $T_{cp}$ ;

$T_{ш} = T_{ш} + 273$  — температура поверхности шлака по Кельвину;

$T_c = T_c + 273$  — температура свободной поверхности слитка ниже кристаллизатора по Кельвину;

$T_{cp} = T_{cp} + 273$  — температура окружающей среды по Кельвину;

$A = \epsilon \cdot 5,74 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град}^4$ , где  $\epsilon = 0,8$  — степень черноты поверхности;

$\lambda_{ст}$  и  $\beta_{ст}$  — соответственно коэффициент теплопроводности и толщина стенки кристаллизатора;

$\lambda_{гф}$  и  $\delta_{гф}$  — соответственно коэффициент теплопроводности и толщина графитовой футеровки. В расчетах использованы данные для сплава типа Инконель.

Теплофизические свойства материала слитка в зависимости от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	20	110	200	300	400	500	600	700	800	900
$\lambda, \text{Вт/см}^\circ\text{C}$	0,11	0,12	0,14	0,15	0,17	0,19	0,20	0,22	0,24	0,25
$\gamma, \text{Дж/см}^3 \cdot ^\circ\text{C}$	5,11	5,19	5,30	5,46	5,78	6,11	6,41	6,29	6,49	6,70

Кроме того, использованы следующие теплофизические данные:  $T_L = 1425 ^\circ\text{C}$ ;  $T_S = 1345 ^\circ\text{C}$ ; в интервале  $T_L > T > T_S$ ,  $\gamma = 6,70 + q_{ск} / (T_L - T_S)$ , где  $q_{ск} = 1270 \text{ Дж/см}^3$  ( $q_{ск}$  — скрытая теплота плавления); при  $T > T_L$   $\lambda = \lambda_{эф} = 0,83 \text{ Вт/см}^\circ\text{C}$ ; для жидкого шлака  $\lambda_{ш} = 1,0 \text{ Вт/см}^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_{ш} = 6,75 \text{ Дж/см}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ .

Типовые результаты численной реализации рассмотренной модели по разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона компьютерной программе приведены как для случая порционной наплавки на заготовку с использованием токоведущего кристаллизатора (рис. 5, а, б), так и для выплавки сплошного слитка (рис. 5, в) при скорости процесса 1 см/мин в обоих случаях.

Видно, что при выплавке сплошного слитка образуется типичная для процесса ЭШП металлическая ванна, для которой характерна значительная глубина и довольно большая двухфазная зона, т. е. зона для  $T_L > T > T_S$ . При наплавке слоя на метал-

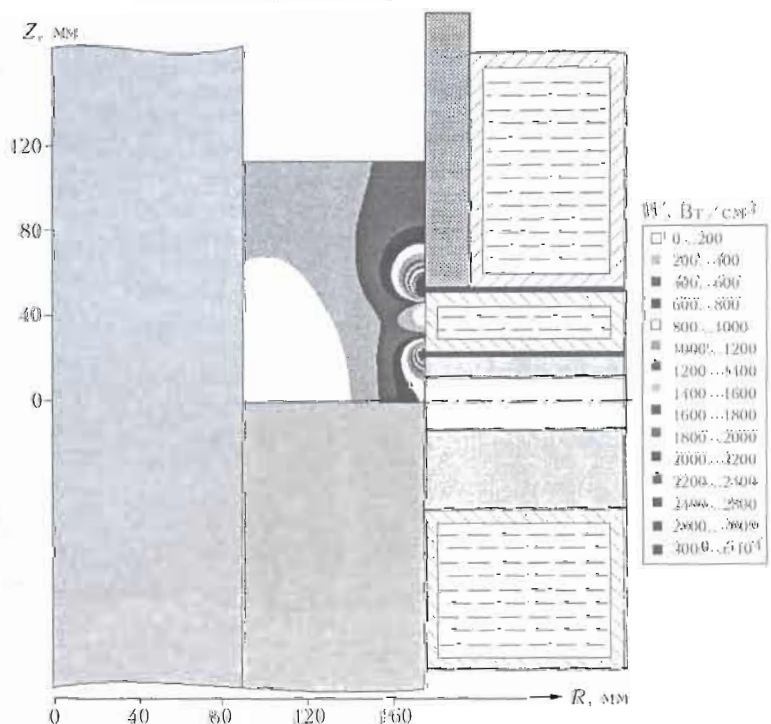


Рис. 4. Тепловыделение  $W(r, z, t)$  в области шлаковой ванны

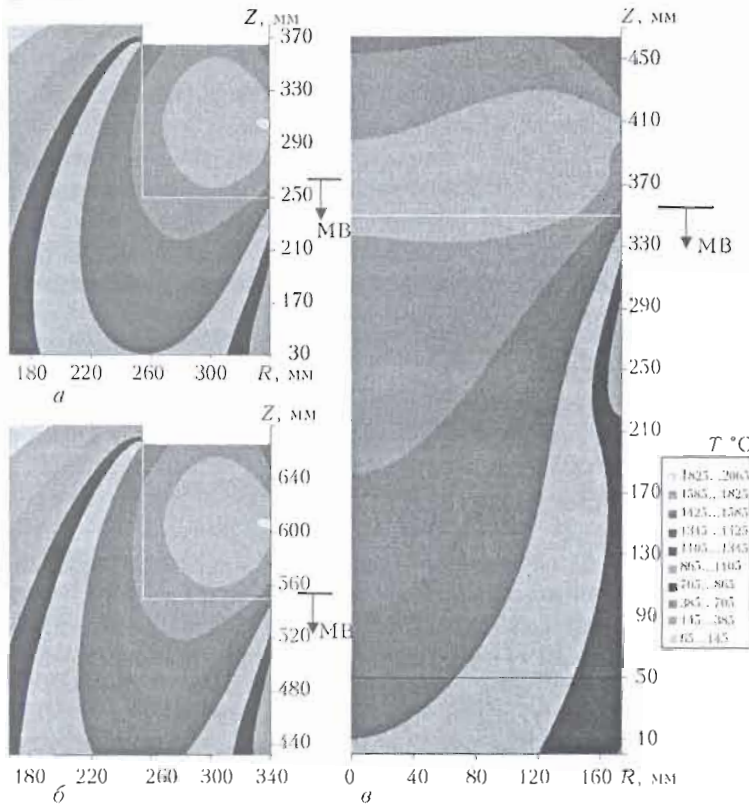


Рис. 5. Распределение температуры  $T$  в слитке через 1800 (а) и 3600 (б) с при наплавке второго слоя, а также через 2400 с при выплавке сплошного слитка диаметром 350 мм (в); стрелкой показан уровень металлической ванны (МВ)

лическую заготовку (рис. 5, а) даже в начале процесса при толщине около 80 мм размеры жидкометаллической ванны значительно меньше, что создает возможность для управления размерами двухфазной зоны.

*Модельные параметры двухфазной зоны.* Прослеживание развития температурных полей, полученных в результате численных расчетов (рис. 5) позволяет получить следующие характерные параметры для каждой точки в двухфазной зоне  $[T_L - T_S]$ : время пребывания металла для точки  $(r, z)$  в двухфазной зоне  $\Delta t_{д.з}$  (рис. 6);

средний градиент температур  $G = (G_L + G_S)/2$ , где  $G_L = \frac{\partial T}{\partial n} = \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2$  в момент, когда температура точки опустится до  $T_L$ , а  $G_S$  — когда температура достигнет  $T_S$  (рис. 7);

параметр  $A$ , согласно Баллантайну и Митчеллу [9-11] определяемый в виде

$$A = \frac{G^2 \Delta t_{д.з}}{T_L - T_S}, \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{с} / \text{см}^2,$$

малое значение которого характеризует равноосный тип кристаллизации, а боль-

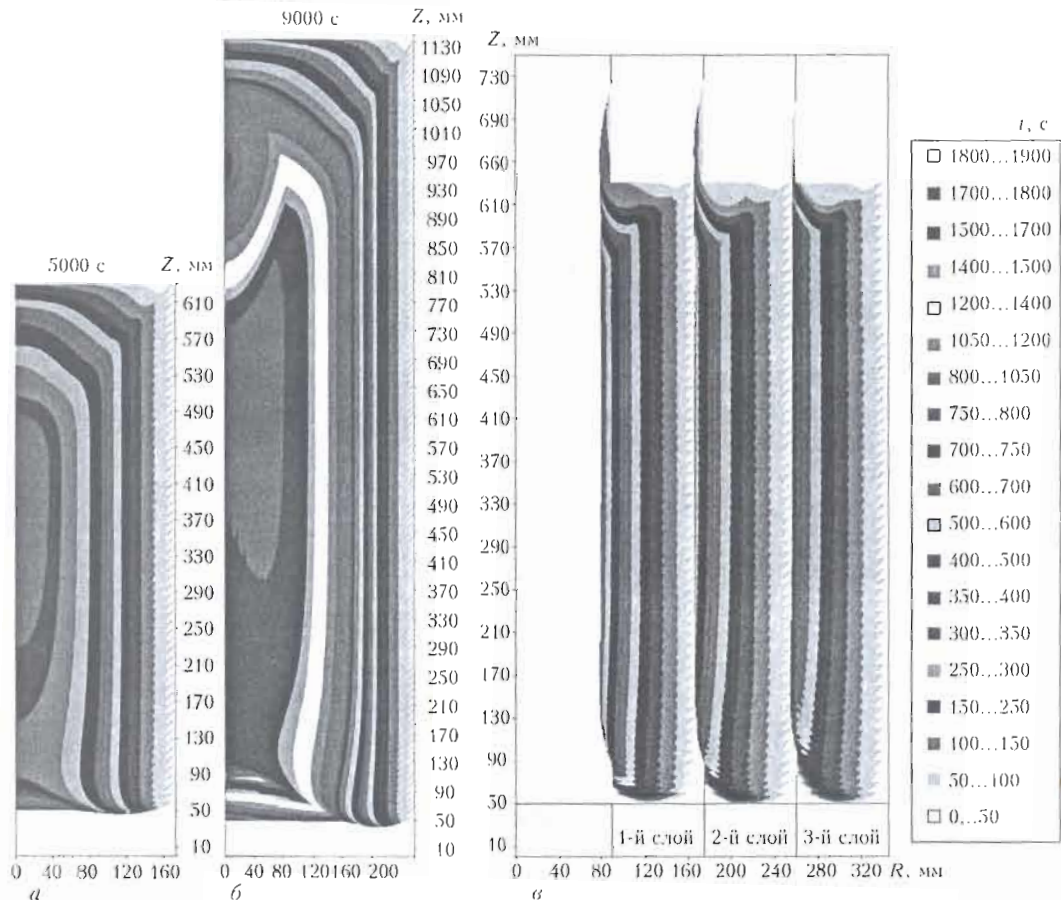


Рис. 6. Время  $t$  пребывания металла в интервале температур  $[T_L - T_S]$  для сплошного слитка диаметром 350 (а), 520 мм для высоты 1200 мм (б) и после наплавки третьего слоя (показано распределение этого параметра и для двух предыдущих слоев) (в); скорость наплавки 1 см/мин

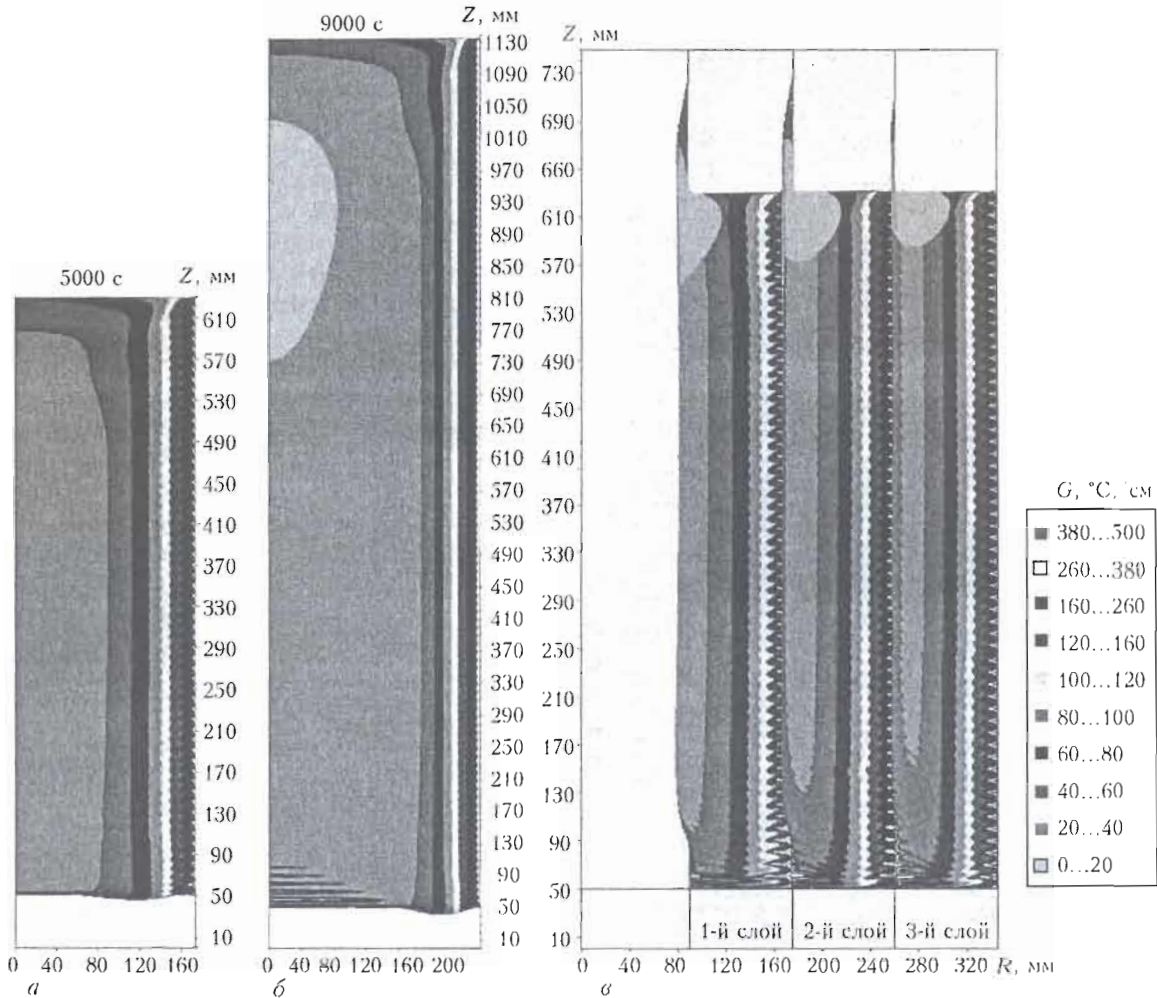


Рис. 7. Градиенты температур  $G$  в двухфазной зоне для слитка диаметром 350 (а), 520 мм для высоты 1200 мм (б) и после наплавки третьего слоя (показано распределение этого параметра и для двух предыдущих слоев) (в); скорость наплавки 1 см/мин

Сравнение энергетических и качественных (в двухфазной зоне) характеристик различных процессов

Параметры	Сплошной слиток на оси			Заготовка + первый слой $\varnothing$ 350 мм		Заготовка + второй слой $\varnothing$ 520 мм		Заготовка + третий слой $\varnothing$ 690 мм	
	$\varnothing$ 350 мм	$\varnothing$ 520 мм	$\varnothing$ 690 мм	на линии сплавления	+ 10 мм	на линии сплавления	+ 10 мм	на линии сплавления	+ 10 мм
Время пребывания $[T_L - T_S]$ , с	790	1700	2200	710	490	590	430	440	340
Градиент температуры $G$ , °C	19... 20	11... 12	9... 10	38	33	50... 52	32	56	38
Максимальный размер карбидов $l_c$ , мкм	23... 24	33... 34	36... 37	22	19	21	18	18	16
Расстояние между осями вторичных дендритов $h_2$ , мкм	130	162	174	127	114	120	110	112	103
Параметр $A$ (Балантайн)	4300	2500... 2800	1800... 2200	12000	6000	20000	5500	17000	6500
Мощность, кВт	245	510	790	200		400		600	
Производительность процесса, кг/ч	459	1013	1784	338		554		771	
Производительность на 1 кДж эффективной энергии, г/кДж*	0,53	0,55	0,63	0,47		0,38		0,35	

\* Без учета затрат на получение жидкого металла и соэф при скорости наплавки 1 см/мин и  $\Delta x = \Delta z = 1$  мм.

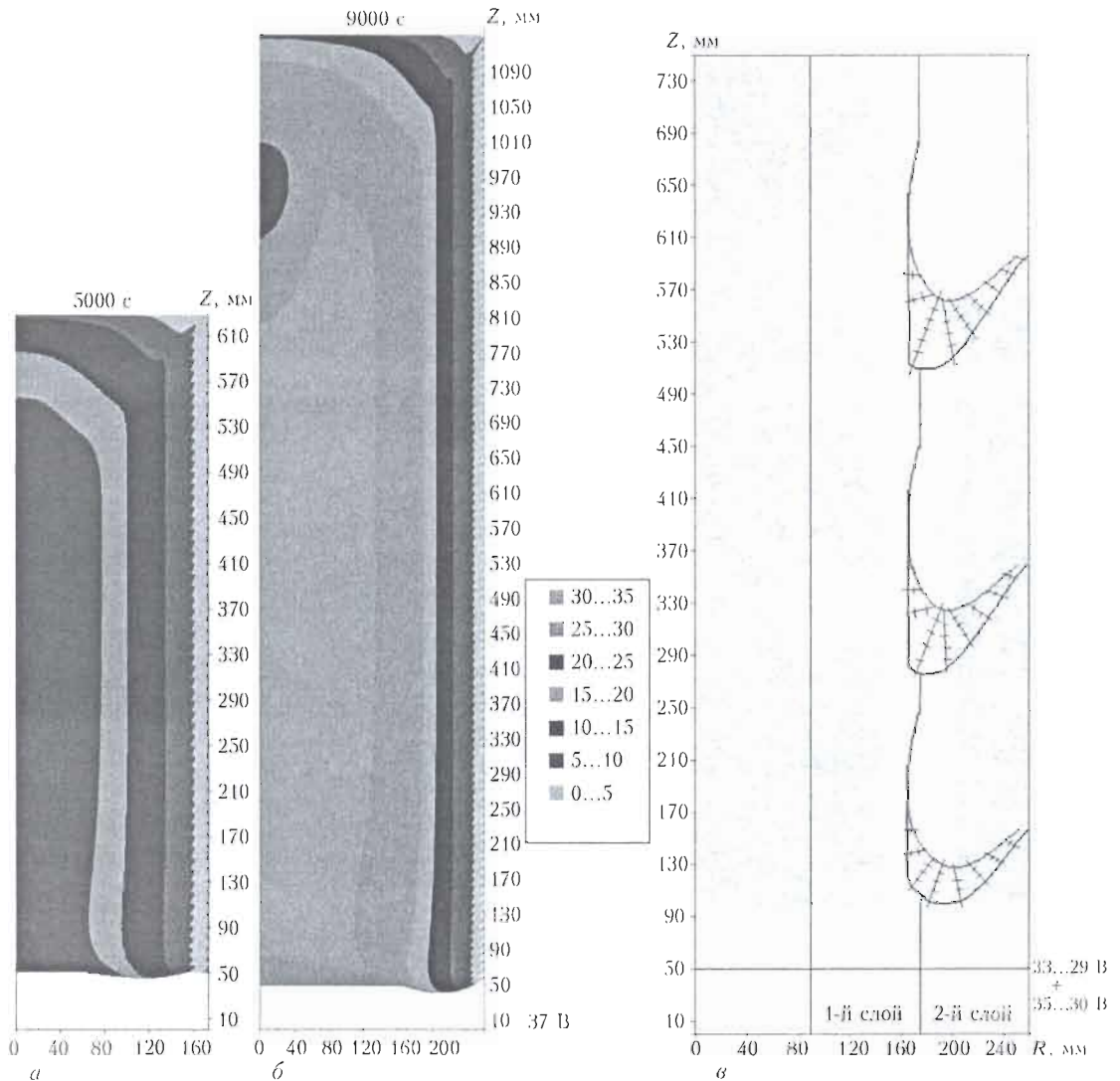


Рис. 8. Максимальные размеры карбидов в двухфазной зоне для слитка диаметром 350 (а), 520 мм для высоты 1200 мм (б); схема расположения первичных и вторичных дендритов при кристаллизации второго слоя (в); скорость наплавки 1 см/мин

шое указывает на наличие дендритной столбчатой структуры;

расстояние между осями вторичных дендритов; максимальные размеры карбидов (NbC), образовавшихся при кристаллизации металлической ванны —  $l_c$  (рис. 8 а, б).

При этом расстояния между осями вторичных дендритов, согласно Баллантайну и Митчеллу [6], определяются формулой

$$h_2 \approx 20,2 \Delta t_{д.з}^{0,28} \text{ [мкм]}, 2l_c \approx 0,3h_2 - 15 \text{ [мкм]}.$$

Схема расположения первичных и вторичных дендритов показана на рис. 8, в.

**Результаты расчета параметров двухфазной зоны.** Примеры расчета указанных параметров для случая выплавки сплошных слитков диаметром 350... 690 мм, а также для слитков, полученных с помощью укрупнения способом многослойной ЭШН ЖМ в токоподводящем кристаллизаторе, приведены на рис. 6–8, а также в таблице.

Из этих данных видно, что параметры состояния металла в двухфазной зоне для канонического слитка ЭШП ухудшаются с ростом его диаметра: увеличивается время пребывания  $\Delta t_{д.з}$ , снижается градиент температур  $G$ , возрастают размеры карбидов  $l_c$  и расстояние между осями вторичных дендритов  $h_2$ , а также уменьшается параметр  $A$ .

Сопоставление с этими данными аналогичных значений для слитков, полученных способом многослойной ЭШН ЖМ в токоподводящем кристаллизаторе, показывает, что основные характеристики металла в двухфазной зоне для самой неблагоприятной стадии наплавки первого слоя являются более предпочтительными, даже по сравнению с выплавкой канонического слитка ЭШП диаметром 350 мм, качество которого считается отвечающим техническим требованиям по получению осадкой заготовок соответствующего диаметра. Естественно, что из слитка диаметром 690 мм, изготовленного по рассматриваемой технологии укрупнения способом многослойной ЭШН ЖМ в токоподводящем кристаллизаторе, можно получить осадкой кованую за-



готовку, по крайней мере, в 2 раза большую по диаметру при хорошем качестве металла.

Итак, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона новый электрошлаковый процесс укрупнения тяжелых слитков, который базируется на одно- или многократной кольцевой ЭШН на центральный слиток способом ЭШН ЖМ в токоподводящем кристаллизаторе металла аналогичного химического состава, позволяет получать заготовки большого диаметра, микроструктура первичной кристаллизации которых соответствует требованиям, обеспечиваемым только в слитках ЭШП малого диаметра. Таким образом, открываются принципиально новые возможности при решении проблемы производства крупных кузнечных слитков ЭШП для поковок роторов и дисков мощных современных паровых и газовых турбин из высоколегированных сталей и сплавов, а также другой крупнотоннажной машиностроительной продукции.

1. *Large 718 forgings for land based turbines* / R. C. Schwant, S. V. Thamboo, A. F. Anderson et al. // *Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives: Proc. intern. symp. Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives* // TMS. — 1997. — № 7. — P. 141–152.
2. Митчелл А. Об изготовлении крупных поковок из сплавов, чувствительных к сегрегации // *Современ. электрометаллургия*. — 2005. — № 2. — С. 3–8.
3. Патон Б. Е., Медовар Л. Б., Саенко В. Я. / О некоторых «старых-новых» задачах ЭШП // Там же. — 2004. — № 3. — С. 7–10.

4. *Новый технологический процесс получения сверхкрупных стальных слитков способом ЭШН ЖМ* / Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Там же. — 2007. — № 1. — С. 3–7.
5. *Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве* / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, Г. С. Маринский и др. — Киев: Наук. думка, 1978. — 303 с.
6. *Математические модели для систем автоматического управления процессом ЭШП полых слитков и крупногабаритных кузнечных слитков* / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Л. В. Чекотило и др. // *Математические методы в исследовании процессов специальной электрометаллургии*. — Киев: Наук. думка, 1976. — С. 99–112.
7. *Некоторые результаты числовых исследований и экспериментальной проверки математической модели выплавки полых слитков ЭШП* / Б. И. Медовар, В. И. Махненко, В. М. Баглай и др. // *Пробл. спец. электрометаллургии*. — 1977. — Вып. 7 — С. 10–13.
8. *Исследование параметров электрошлаковой плавки в токоподводящем кристаллизаторе* / Ю. М. Кусков, В. И. Ус, С. В. Томиленко и др. // Там же. — 1995. — № 3. — С. 24–28.
9. Баллантайн А. С., Митчелл А., Вадье Дж. Ф. Прогнозирование структуры слитков сплава Инконель 718 ЭШП и ВДП // *Электрошлаковый переплав*. — Киев: Наук. думка, 1983. — Вып. 6. — С. 198–202.
10. *The Macroscale Simulation of Remelting Processes* / L. A. Bertram, P. R. Schusk, S. N. Kempka et al. // JOM. — 1998, March. — P. 16–21.
11. *The Stochastic Modelling of Solidification Structures in Alloy 718 Remelt Ingots* // L. Nastac, S. Sundarra, O. Ku et al. // Ibid. — P. 30–35.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 09.09.2008

УДК 669.117.56

## ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

А. Митчелл

Приведен обзор исследований в области применения электрошлакового переплава (ЭШП) для материалов аэрокосмической промышленности, показаны результаты этих исследований.

Review is made of investigations in the field of ESR application for materials of aerospace industry, the results of these investigations are shown.

**Ключевые слова:** электрошлаковый переплав; сплавы; детали двигателей; качество

**Введение.** Впервые ЭШП в производстве аэрокосмических сплавов применили как процесс Гопкинса с целью повышения качества изделий. Технологии открытой индукционной (ОИП) или электродуговой (ЭДП) плавки были непригодны для получения высоколегированных сталей или сплавов на основе никеля с необходимым уровнем чистоты металла и низким содержанием серы, требуемых для изготовления деталей двигателей. Этот процесс, в котором использовали плавку на постоянном токе на возду-

хе, обеспечивал более высокое качество металла, чем ОИП, ЭДП, однако вскоре был вытеснен из-за преимущества вакуумной технологии как при вакуумно-индукционной плавке (ВИП), так и при вакуумно-дуговом переплаве (ВДП), а также других способах вторичной обработки электросталей (вакуумирование, ковшевая металлургия, позднее АОД). В это же время, главным образом благодаря работам Б. И. Медовара по применению технологии ЭШП на переменном токе, в бывшем СССР получены существенные результаты при производстве стальных изделий ЭШП высокого качества. Несмотря на очевидный прогресс в создании технологий вакуумной