

Подсчитаем скорость фильтрации расплава через сетку дендритов под влиянием ферростатического давления столба жидкой стали высотой 5 м:  $\omega = q/f$ . При этом примем  $m = 0,25$ ;  $l_1 = 0,6 \cdot 10^{-3}$  м;  $l_2 = 10^{-4}$  м;  $\rho_0 = 7050$  кг/м<sup>3</sup>;  $H = 5$  м;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $s = 0,05$  м;  $\mu = 5,4 \cdot 10^{-3}$  Па·с;  $p_* = p_k = 0$ , получим:

$$\omega = \frac{ml_1 l_2}{24s\mu\pi C_0^3} \rho_0 g H \cong 0,0028 \text{ м/с.}$$

Отметим, что при  $\sigma_{12} = 1100$  МН/м<sup>2</sup> и  $r_0 = 10^{-4}$  м капиллярное давление  $p_{k0}$  составит 0,22 ат ( $\sigma_{12}/r_0$ ), тогда как ферростатическое давление столба жидкой стали высотой 5 м составляет примерно 3,46 ат.

Давление молекулярного водорода в порах стального слитка зависит от исходного содержания водорода в расплаве. Соответствующие подсчеты показывают [7], что если исходное содержание водорода в стали равно 8 ... 9 см<sup>3</sup>/100 г, то давление газа в порах достигает 1 ат и может уравновесить ферростатическое давление столба жидкой стали высотой 1,43 м.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коллинз Р. Течения жидкостей через пористые материалы. — М.: Мир, 1964. — 350 с.
2. Справочник физических констант горных пород. — М.: Мир, 1969. — 544 с.
3. Полубринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. — 2-е изд. — М.: Наука, 1974. — 664 с.
4. Pivonka T.S., Flemings M.C. — Trans. of the Met. Soc. of AIME, 1966, v. 236. — P. 1157—1165.
5. Arelia D., Hemings M.C., Mehrabian R. — Metal. Trans., 1974, v. 5—P. 2533—2537.
6. Карслоу Г., Егер Дж. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964. — 488 с.
7. Самойлович Ю.А. Формирование слитка. — М.: Металлургия, 1977. — 160 с.

УДК 621.762:669-158.81

А.С. КАЛИНИЧЕНКО, Э.А. ГУРВИЧ,  
Н.П. ЖМАКИН, канд-ты техн. наук,  
М.А. АНТОНЕВИЧ (БПИ)

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЗАКАЛКИ ИЗ РАСПЛАВА НА СКОРОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ ТОНКОЙ ЗАГОТОВКИ

Одним из перспективных методов получения материалов с высокими эксплуатационными свойствами является процесс закалки из жидкого состояния [1, 2]. Высокие скорости охлаждения (более 10<sup>3</sup> К/с) способствуют формированию структуры при неравновесных условиях. Возникающие при этом значительные переохлаждения перед кристаллизацией создают возможности для достижения высоких степеней пересыщения твердых растворов, фиксации метастабильных фаз и в пределе — аморфного состояния. Для создания промышленной технологии необходимо определить условия процесса, при которых обеспечивается оптимальная скорость охлаждения расплава.

Существуют аналитические решения задачи охлаждения расплава в процессе закалки из жидкого состояния [1, 3—5]. Однако необходимость введения

значительных допущений при этом не позволяет оценить влияние на процесс таких параметров, как качество обработки, геометрические размеры и теплофизические свойства теплоотводящей среды, условия охлаждения и изменение толщины заготовки в процессе установления стационарного режима.

В настоящей работе было проведено численное моделирование процесса охлаждения слоя расплава на металлической подложке при закалке из жидкого состояния.

Расчет осуществлялся для одномерного случая, поскольку толщина формирующегося изделия во много раз меньше размеров в других направлениях. Дифференциальное уравнение теплопроводности в этом случае записывается в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial \bar{x}^2},$$

где  $\kappa = \lambda / (\rho C)$  — коэффициент температуропроводности;  $\lambda$ ,  $C$ ,  $\rho$  — соответственно коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость материала и его плотность.

При построении разностной схемы в качестве характерного размера была выбрана толщина  $a = X_2 + \delta$  ( $X_2$  — толщина формы,  $\delta$  — толщина слоя расплава), а в качестве характерной температуры — температура окружающей среды вдали от поверхности расплава. В безразмерных координатах дифференциальное уравнение, описывающее температурное поле системы расплав—форма, можно записать:

$$a^2 C_i (U_i) \rho_1 \frac{\partial U_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_i (U_i) \frac{\partial U_i}{\partial x} \right],$$

где  $i = 1, 2$  — соответственно для отливки и формы,  $\bar{x} = x/a$  — безразмерная координата.

Граничные условия имеют вид:

$$\lambda_1 \frac{\partial U_1}{\partial \bar{x}} = -a \alpha_c (U_{1n} - U_{cp}), \quad \bar{x} = 1, t > 0;$$

$$\lambda_1 \frac{\partial U_1}{\partial \bar{x}} = a \alpha_1 (U_{1в} - U_{2в}), \quad \bar{x} = a_1/a, t > 0;$$

$$\lambda_2 \frac{\partial U_2}{\partial \bar{x}} = a \alpha_1 (U_{1в} - U_{2в}), \quad \bar{x} = a_1/a, t > 0;$$

$$\lambda_2 \frac{\partial U_2}{\partial \bar{x}} = a \alpha_2 (U_{2п} - U_{охл}), \quad \bar{x} = 0, t > 0,$$

где  $U_{cp} = (T_{cp} - T_0)/T_0$ ,  $U_{охл} = (T_{охл} - T_0)/T_0$ ,  $U_i = (T_i - T_0)/T_0$ ;  $T_{охл}$ ,  $T_{cp}$  — температуры воды и окружающего воздуха соответственно. В качестве допущения принято линейное начальное распределение температуры в слое расплава и в форме. Решение задачи осуществлялось методом сеток с использованием неявной четырехточечной конечно-разностной схемы.

На рис. 1 и 2 показано влияние различных параметров процесса закалки из жидкого состояния алюминиевого сплава типа силумин толщиной от 10 до 100 мкм на скорость охлаждения заготовки.

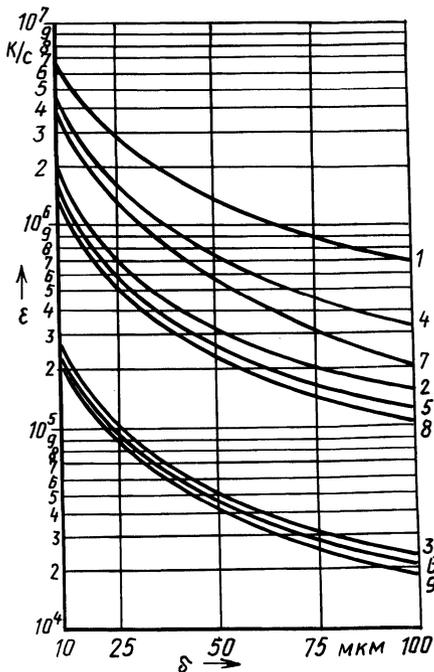


Рис. 1. Влияние материала подложки на скорость охлаждения расплава различной толщины при  $T_{1,0} = 1300$  К и  $T_{2,0} = 283$  К:

1...3 – на медной подложке; 4...6 – на стальной; 7...9 – на керамической. Коэффициент теплоотдачи от расплава: 1, 4, 7 – 300; 2, 5, 8 – 100; 3, 6, 9 –  $10$  кВт/(м<sup>2</sup> · К).

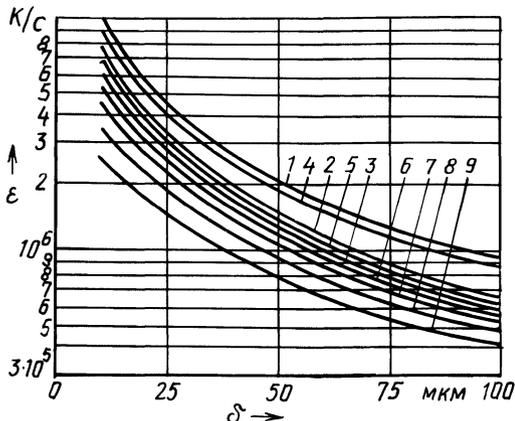


Рис. 2. Влияние температур подложки и расплава на скорость охлаждения слоя расплава различной толщины на медной подложке:

1...3 –  $T_{1,0} = 1500$  К; 4...6 –  $T_{1,0} = 1300$  К; 7...9 –  $T_{1,0} = 1050$  К; 1, 4, 7 –  $T_{2,0} = 77$  К; 2, 5, 8 –  $T_{2,0} = 283$  К; 3, 6, 9 –  $T_{2,0} = 373$  К.

Из рисунков видно, что наиболее существенное влияние на процесс формирования тонкой заготовки оказывает качество обработки теплопроводящей поверхности. Этот параметр выражается через эффективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1 = \lambda_3 / \delta_3$  ( $\lambda_3$  – эффективный коэффициент теплопроводности материала зазора, образованного за счет шероховатости поверхности [6],  $\delta_3$  – средняя высота микронеровностей).

При изменении  $\alpha_1$  в пределах  $10 \dots 300$  кВт/(м<sup>2</sup> · К) скорость охлаждения можно увеличить в 40 раз, в зависимости от толщины заготовки и материала

теплоотводящей поверхности. Чем больше толщина заготовки, тем большее влияние оказывает материал теплоотводящей поверхности при прочих равных условиях (рис. 1).

Температура заливки при перегревах выше 300 °С оказывает незначительное влияние на уровень достижимых скоростей охлаждения (рис. 2). Из рис. 2 также видно, что с увеличением начальной температуры абсолютно сухой подложки скорость охлаждения заготовки падает.

Таким образом, выбирая параметры процесса и управляя в конечном итоге скоростью охлаждения ленты, можно обеспечить требуемые структуры материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мирощниченко И.С. Закалка из жидкого состояния. — М.: Metallurgia, 1982. — 168 с.
2. Jones H. Rapid Solidification of Metals and Alloys. The Institution of Metallurgists. — London, 1982. — 86 p.
3. Старовойтенко Е.И., Мусиенко В.Т., Бейзеров С.М. Расчет скорости охлаждения частиц расплава при соударении с медной водоохлаждаемой подложкой // Порошковая металлургия. — 1981. — № 6. — С. 16–21.
4. Об определении скорости охлаждения при закалке из жидкого состояния / Ю.К. Ковнеристый, Н.П. Бологина, А.А. Раваев и др. // Изв. АН СССР. Металлы. — 1983. — № 4. — С. 76–79.
5. Дембовский С.А., Четчин Е.А. Оценка критических скоростей охлаждения для получения аморфных металлических сплавов // Изв. АН СССР. Металлы. — 1983. — № 3. — С. 82–86.
6. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. — М.: Энергия, 1977. — 328 с.

УДК 621.746.6

Ю.А. ЛОСЮК, канд. техн. наук (БПИ),  
Э.Ф. БАРАНОВСКИЙ, канд. техн. наук,  
В.Н. ТЮЛЮКИН (Могилевское отделение  
ФТИ АН БССР)

#### ОПТИМИЗАЦИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ВАЛКОВОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА

Процесс бесслитковой прокатки осуществляется на стане, два валка-кристаллизатора которого располагаются в горизонтальной плоскости. Между ними заливается расплав. Он намораживается в виде корочек на каждом из валков. Затем в зоне прокатки корочки свариваются, образуя непрерывную ленту.

Основным узлом стана являются валки-кристаллизаторы с внутренним каналом. Качество получаемой ленты и устойчивость процесса ее изготовления во многом определяются их тепловым режимом.

Тепловой режим каждого валка-кристаллизатора обусловлен, с одной стороны, интенсивностью и длительностью нагрева в зоне намораживания и деформации заготовки, с другой, — условиями охлаждения внутренней поверхности водой, а внешней рабочей — воздухом.

Для стабилизации технологического процесса бесслитковой прокатки важно определить такие условия охлаждения валка, при которых в нем быстро устанавливается оптимальный тепловой режим.