

после обработки давлением можно объяснить высокой чистотой электрошлакового металла по примесям, отсутствием окисленных пленок на поверхности усадочных микрополостей. В результате стала возможна так называемая твердофазная заварка микропор [6].

Таким образом, технология ЦЭШЛ применительно к кольцепрокатному производству позволяет получать заготовки из легированной стали 20Х2Н4А с хорошим качеством поверхности и высоким комплексом механических свойств. При этом прочность, пластичность и вязкость не зависят от направления вырезки образцов. Это дает возможность использовать их в литом состоянии с незначительными припусками на механическую обработку. Можно рекомендовать их использование в кольцепрокатном производстве в ряде случаев в литом виде либо после раскатки.

Выводы

- Отливки ЦЭШЛ из конструкционных сталей типа 20Х2Н4А характеризуются высокой химической и физической однородностью, высоким уровнем механических свойств и изотропностью.
- Отливки ЦЭШЛ из стали 20Х2Н4А могут использоваться для изготовления раскатных колец без предварительной механической обработки, что упрощает процесс их производства и снижает стоимость раскатных колец.



Список литературы

1. Электрошлаковый переплав на кулебакском металлургическом заводе им. С.М. Кирова / А. Я. Рабинович, Б. Р. Желнин, А. В. Маринин и др. // Электрошлаковая технология. – Киев: Наук. думка, 1983. – С. 43-49.
2. Панин В. В., Смирнов Б. С., Лобжанидзе Р. Б. Выплавка полых заготовок для раскатных колец. // Спец. электрометаллургия. - 1973. - Вып. 22. - С. 24-28.
3. Медовар Б. И., Маринский Г. С., Шевцов В. Л. Центробежное электрошлаковое литье. – Киев: Знание, 1983. – 48 с.
4. Электрошлаковая тигельная плавка и разливка металла / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, В. И. Мартын и др. – Киев: Наук. думка, 1998. – 216 с.
5. Марочник сталей и сплавов /А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский и др. / Под ред. А. С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
6. Медовар Б. И. Металлургия вчера, сегодня и завтра. - Киев: Наук. думка, 1986. – 131 с.

Поступила 15.01.2009

УДК 621.74.046:086.5

Ю. Н. Романенко, Е. Г. Афтандиянц, О. А. Пеликан, И. О. Шинский
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ПЕРЕХОДНЫХ СЛОЯХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК

Представлены методика и результаты компьютерного моделирования процессов теплообмена и диффузионного перераспределения элементов в переходном слое при формировании биметаллических отливок. Экспериментальными исследованиями подтверждена адекватность разработанной методики. Установлены закономерности влияния температуры и химического состава на теплопроводность, теплоемкость и плотность сплавов биметаллической пары, а также на диффузию углерода, кремния, марганца, хрома и молибдена в твердом и жидком состояниях. Приведена оценка точности аппроксимирующих зависимостей и рассчитаны их погрешности.

Представлено методику та результати комп'ютерного моделювання процесів теплообміну і дифузійного перерозподілу елементів в перехідному шарі при формуванні біметалевих виливків. Експериментальними дослідженнями підтверджено адекватність розробленої методики. Встановлено закономірності впливу температури та хімічного складу на теплопровідність, теплоємність і густину сплавів біметалевої пари, а також на дифузію вуглецю, кремнію, марганцю, хрому та молібдену в твердому і рідкому станах. Наведено оцінку точності апроксимуючих залежностей та розраховані їх похибки.

The technique and results of computer modelling of heat exchange processes and diffusive redistributions of elements in a transitive layer at formation bimetallic castings are submitted. Experimental researches confirm adequacy of the developed technique. Regularities of influence of temperature and chemical composition on heat conductivity, thermal capacity and density of alloys of bimetallic pair, and also on diffusion of carbon, silicon, manganese, chromium and molybdenum in solid and liquid conditions are determined. The estimation of approximating dependences accuracy is resulted and their errors are designed.

Ключевые слова: моделирование, распределение элементов, биметаллические отливки.

Необходимость увеличения долговечности быстроизнашивающихся деталей машин и оборудования в горно-металлургическом производстве, угольной, цементной, строительной и других отраслях промышленности предопределяет постановку и развитие работ по созданию научных основ управления процессами формирования износостойких биметаллических отливок широкой номенклатуры. К числу таких деталей относятся рабочие органы роторных, молотковых, центробежно-ударных дробилок (молотки, била, отбойные плиты, футеровочные плиты, сбрасыватели и другие), предназначенные для измельчения гранита, базальта, клинкера, перлита, гипсового камня, угля и другого высокоабразивного минерального сырья.

Наиболее распространенная технологическая схема изготовления биметаллических отливок рабочих органов дробилок заключается в последовательной заливке в литейную форму углеродистой или низколегированной стали (металл-основа) и износостойкого высокохромистого чугуна (рабочий слой). Формирование переходного слоя между сплавами происходит в условиях контакта затвердевшей стали с чугуном, находящимся в жидком, жидко-твердом и твердом состояниях.

Образующийся переходной слой оказывает существенное влияние на механические и эксплуатационные свойства биметаллической отливки. Поэтому изучение процесса формирования его состава и структуры является первоочередной задачей при разработке оптимальных технологических параметров получения высококачественных биметаллических отливок.

Важной составляющей моделирования распределения элементов в переходных слоях биметаллических отливок является определение температурно-временных условий их охлаждения после заливки литейной формы.

Температурные поля и скорость охлаждения различных участков отливок изучали методом компьютерного эксперимента при помощи разработанной программы, позволяющей получать решение для регулярного ортогонального разбиения расчетной области на конечные элементы. В основу моделирования положено решение уравнения теплопроводности, которое для двухмерного случая имеет следующий вид:

$$\rho \cdot c_{\text{эф}} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где $c_{\text{эф}}$ - эффективная теплоемкость, учитывающая фазовые превращения, Дж/(кг · С); ρ - плотность, кг/м³; λ - теплопроводность, Вт/(м · °С); T - температура, °С; τ - время, с.

$$c_{\text{эф}} = c + \frac{L}{T_{\text{лик}} - T_{\text{сол}}}, \quad (2)$$

где c – теплоемкость, Дж/(кг · °С); L – теплота кристаллизации, Дж/кг; $T_{лик}$ – температура ликвидус, °С; $T_{сол}$ – температура солидус, °С.

Для численного решения уравнения (1) разработали схему сохранения тепловых потоков для элементарного элемента, сформированного в окрестности узла P (рис. 1), и составили уравнение теплового баланса, которое имеет следующий вид:

$$\frac{\rho \cdot c \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot (T_P - T_{0P})}{\Delta \tau} = \lambda_1 \frac{T_1 - T_P}{\Delta x} + \lambda_2 \frac{T_2 - T_P}{\Delta y} - \lambda_3 \frac{T_3 - T_P}{\Delta x} - \lambda_4 \frac{T_4 - T_P}{\Delta y}, \quad (3)$$

где T_{0P} – начальная температура узла, °С; T_P – конечная температура узла, °С.

От соседних по отношению к узлу P элементов поступают потоки теплоты за счет теплопроводности. В результате происходит увеличение тепловой энергии в рассматриваемом элементе, что будет обнаружено по повышению температуры от T_{0P} до T_P за время $\Delta \tau$.

Следует отметить, что температура T_P в центральном элементе и температуры T_1, T_2, T_3 и T_4 в окружающих узлах — неизвестные величины на следующем временном шаге, тогда как T_{0P} — известное значение, которое взято из предыдущего шага по времени или из начальных условий. Поэтому зависимость (3) является уравнением с пятью неизвестными. Всего таких уравнений можно составить столько, сколько существует неизвестных температур в узлах сетки. Для определения температур необходимо решить систему уравнений.

Если в уравнении (3) разницу температур во втором, третьем, четвертом и пятом операторах теплопроводности записать для предварительного временного шага и обозначить «0», то имеется явная схема. При этом в каждом уравнении содержится одно неизвестное значение T_P в первом операторе, который описывает изменение энергии во времени. Алгоритм вычислений в этом случае не представляет особой сложности, однако если временной шаг превысит некоторое критическое значение при расчете, то возникнут прогрессирующие паразитные осцилляции температуры. Для предотвращения такого явления необходимо выполнение условия сходимости

$$\Delta \tau \leq \frac{\rho \cdot c \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{\lambda \cdot N}, \quad (4)$$

где N — отношение начальной температуры системы к ее изменению за время $\Delta \tau$ (принимается ≥ 100).

Описанная методика расчета является реализацией явной схемы метода конечных элементов и более детально изложена в работе [1].

Аналогичным образом составили уравнение изменения температуры переходного слоя ($T_{ПС}$) зоны контакта металла-основы и рабочего слоя. Схема определения температуры показана на рис. 2.

Уравнение изменения температуры переходного слоя в зоне контакта “сталь-чугун” имеет следующий вид:

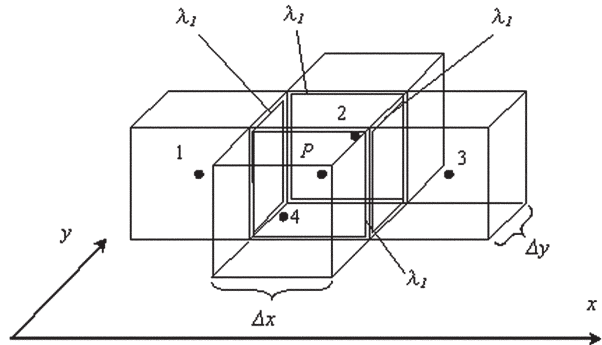


Рис. 1. Схема тепловых потоков для элементарного элемента

$$\begin{aligned}
 T_{\text{ПС}} &= \frac{T_{\text{РС1}} + T_{\text{О1}}}{2} = \\
 &= \frac{1}{2} \left(\left(\lambda_{\text{О}} \frac{T_{\text{О2}}^0 - T_{\text{О1}}^0}{\Delta x} - \lambda_{\text{О}} \frac{T_{\text{О1}}^0 - T_{\text{РС1}}^0}{\Delta x} \right) \frac{\Delta \tau}{\rho_{\text{О1}} c_{\text{О1}} \Delta x} + T_{\text{О1}}^0 \right) + \\
 &+ \frac{1}{2} \left(\left(\lambda_{\text{РС}} \frac{T_{\text{О1}}^0 - T_{\text{РС1}}^0}{\Delta x} - \lambda_{\text{РС}} \frac{T_{\text{РС1}}^0 - T_{\text{РС2}}^0}{\Delta x} \right) \frac{\Delta \tau}{\rho_{\text{РС1}} c_{\text{РС1}} \Delta x} + T_{\text{РС1}}^0 \right).
 \end{aligned} \tag{5}$$

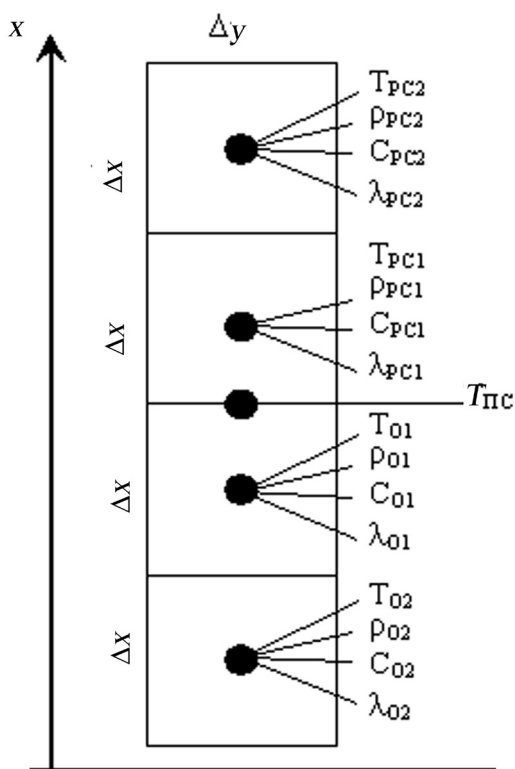


Рис. 2. Схема определения температуры переходного слоя в зоне контакта металла-основы и рабочего слоя (Δx=Δy)

Уравнения (3), (5) показывают, что для расчета температур произвольных локальных участков в объеме и на поверхности контакта слоев биметаллических отливок необходима информация о теплопроводности, теплоемкости и плотности этих участков, которые существенно зависят от химического состава и температуры металлов.

В результате анализа экспериментальных данных, приведенных в работах [2-5], установлено, что для материалов, применяемых для изготовления металла-основы и рабочего слоя биметаллических отливок, закономерности влияния химического состава и температуры на теплопроводность, теплоемкость и плотность имеют следующий вид:

1. Теплопроводность в твердом и жидком состояниях:

1.1. Углеродистые и низколегированные стали:

$$\begin{aligned}
 \lambda_{\text{сталь}} &= 62,9 - 39,55 \cdot C - 6,021 \cdot \text{Mn} + 2,677 \cdot \text{Si} - 2,027 \cdot \text{Cr} + 1580 \cdot \text{S} - 1180 \cdot \text{P} - 49,82 \cdot \text{Cu} - \\
 &- 0,5754 \cdot \text{Ni} + 13,54 \cdot \text{Mo} - 60,20 \cdot \text{Ti} - 41,99 \cdot \text{V} - 0,02018 \cdot T; \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}); \\
 \delta &= 8,20 \%; R = 0,833.
 \end{aligned} \tag{6}$$

1.2. Серые чугуны:

$$\begin{aligned}
 \lambda_{\text{чл}} &= 29,9 + 25,12 \cdot C + 2,688 \cdot \text{Si} - 22,88 \cdot \text{Mn} - 14,47 \cdot \text{C}_s - 0,008449 \cdot T; \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}); \\
 \delta &= 2,79 \%; R = 0,919.
 \end{aligned} \tag{7}$$

1.3. Легированные чугуны:

$$\begin{aligned}
 \lambda_{\text{лс}} &= 53,1 - 0,4397 \cdot \text{Cr} - 7,073 \cdot \text{S} + 219,9 \cdot \text{P} + 6,159 \cdot \text{Mo} - \\
 &- 2,027 \cdot \text{Al} - 5,227 \cdot \text{C}_s - 0,01016 \cdot T; \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}); \\
 \delta &= 12,9 \%; R = 0,739.
 \end{aligned} \tag{8}$$

2. Теплоемкость:

2.1. Серые чугуны:

• в твердом состоянии

$$c_{\text{ТВ}}^{\text{СЧ}} = 661 - 153,7 \cdot C_3 + 0,6573 \cdot T; \quad (9)$$

$$\delta = 0,39 \%; R = 0,993;$$

- в жидком состоянии

$$c_{\text{Ж}}^{\text{СЧ}} = -499 + 194,8 \cdot C_3 + 0,5596 \cdot T; \quad (10)$$

$$\delta = 0,32 \%; R = 0,996.$$

2.2. Легированные чугуны:

- в твердом состоянии

$$c_{\text{ТВ}}^{\text{ЛЧ}} = (661 - 153,7 \cdot C_3 + 0,6573 \cdot T) \cdot (1 + (6 \cdot 10^{-6} \cdot T - 0,0041) \cdot \text{Cr} + (-7 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,004) \cdot \text{Ni} - 0,141 \cdot \text{Mn} - 0,123 \cdot \text{Mo}); \quad (11)$$

- в жидком состоянии

$$c_{\text{Ж}}^{\text{ЛЧ}} = (-499 + 194,8 \cdot C_3 + 0,5596 \cdot T) \cdot (1 + (6 \cdot 10^{-6} \cdot T - 0,0041) \cdot \text{Cr} + (-7 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,004) \cdot \text{Ni} - 0,141 \cdot \text{Mn} - 0,123 \cdot \text{Mo}). \quad (12)$$

2.3. Углеродистые и низколегированные стали:

- в твердом состоянии

$$c_{\text{ТВ}}^{\text{СТ}} = 529 + 44,71 \cdot C_3 + 0,2598 \cdot T - 2811 \cdot \text{S} + 28,59 \cdot \text{Mo} - 520,7 \cdot \text{Ti}; \quad (13)$$

- в жидком состоянии

$$c_{\text{Ж}}^{\text{СТ}} = 646,3 + 54,62 \cdot C_3 + 0,3174 \cdot T - 3434 \cdot \text{S} + 34,93 \cdot \text{Mo} - 636,2 \cdot \text{Ti} \quad (14)$$

3. Плотность:

3.1. Серые чугуны:

- в твердом состоянии

$$\rho_{\text{ТВ}}^{\text{СЧ}} = 7,63 - 0,08707 \cdot C_3 - 0,0003876 \cdot T, \text{ г/см}^3; \quad (15)$$

$$\delta = 1,43 \%; R = 0,817;$$

- в жидком состоянии

$$\rho_{\text{Ж}}^{\text{СЧ}} = 8,14 + 0,01656 \cdot C_3 - 0,001059 \cdot T, \text{ г/см}^3; \quad (16)$$

$$\delta = 1,22 \%; R = 0,819.$$

3.2. Легированные чугуны:

- в твердом состоянии

$$\rho_{\text{ТВ}}^{\text{ЛЧ}} = 7,95 + 0,06405 \cdot \text{Mo} + 0,08151 \cdot \text{Ti} - 0,1161 \cdot C_3 - 0,0005621 \cdot T, \text{ г/см}^3; \quad (17)$$

$$\delta = 1,84 \%; R = 0,878;$$

- в жидком состоянии

$$\rho_{\text{Ж}}^{\text{ЛЧ}} = 8,69 - 0,09435 \cdot \text{C} + 0,02544 \cdot \text{Mn} + 0,2075 \cdot \text{S} + 0,08733 \cdot \text{Mo} + 0,02770 \cdot \text{Ni} + 0,05513 \cdot \text{Ti} - 0,04189 \cdot C_3 - 0,001072 \cdot T, \text{ г/см}^3; \quad (18)$$

$$\delta = 1,42 \%; R = 0,896.$$

3.3. Углеродистые и низколегированные стали:

- в твердом состоянии

$$\rho_{\text{ТВ}}^{\text{СТ}} = 7,95 - 0,3016 \cdot \text{C} + 0,05887 \cdot \text{Si} - 0,01565 \cdot \text{Mn} + 0,1183 \cdot \text{Cr} - 0,1872 \cdot \text{Ni} - 0,4218 \cdot \text{Mo} - 0,0002720 \cdot T, \text{ г/см}^3 \quad (19)$$

$$\delta = 1,25 \%; R = 0,778;$$

- в жидком состоянии

$$\rho_{\text{ж}}^{\text{ст}} = 8,55 - 0,1167 \cdot C - 0,1108 \cdot \text{Si} + 0,1751 \cdot \text{Mn} - 0,06655 \cdot \text{S} + 0,07423 \cdot \text{P} + 0,01313 \cdot \text{Cr} + 0,03335 \cdot \text{Ni} + 0,3333 \cdot \text{Ti} + 0,05334 \cdot \text{Mo} - 0,001032 \cdot T, \text{ г/см}^3; \quad (20)$$

$$\delta = 1,20 \%, R = 0,736,$$

где C_s – углеродный эквивалент чугуна, %; C, Si, Mn, S, P, Cr, Ni, Ti, Mo, V, Al, Cu – содержание элементов в сплаве, %; T – температура, °C; δ – средняя относительная ошибка аппроксимации, %; R – множественный коэффициент корреляции.

Использование вышеприведенных закономерностей позволяет ускорить и упростить процесс расчета температурных полей биметаллических отливок.

Диффузионное перераспределение легирующих элементов в переходных слоях изучали на основании первого закона Фика

$$m = -S \cdot D \cdot \frac{dC}{dx}, \quad (21)$$

где m – количество вещества, диффундирующего в единицу времени, кг/с; S – площадь сечения, см²; dC/dx – градиент концентрации, кг/см²; D – коэффициент диффузии, см²/с; x – расстояние, см.

Подходы и методы, которые использовали при моделировании перераспределения элементов, аналогичны тем, которые были применены при моделировании процессов теплообмена, что объясняется математической идентичностью уравнений теплопроводности и диффузии.

При моделировании диффузионных процессов принимали следующие условия:

- химический состав металла-основы и рабочего слоя в направлениях, параллельных плоскости контакта, является гомогенным;
- массообмен происходит вдоль оси, перпендикулярной плоскости контакта металла-основы и рабочего слоя.

При расчетах использовали регулярное одномерное разбиение исследуемой области на конечные элементы. Узлами такого разбиения принимали центры каждого элемента. В качестве начальных условий задавали концентрации легирующих элементов в узлах разбиения, после чего по формуле (21) проводили итерационный расчет диффузионных потоков на границах элементов. По разностям потоков вычисляли изменение концентрации каждого легирующего элемента, при этом коэффициент диффузии рассчитывали как средний между двумя соседними конечными элементами.

Для обеспечения устойчивости итерационного расчета вывели условие сходимости

$$\Delta\tau = \frac{\rho \cdot \Delta x^2 \cdot C_i^{\text{ст}}}{D \cdot C_i^{\text{ч}} \cdot 100}, \quad (22)$$

где $\Delta\tau$ – минимальный допустимый временной интервал расчета, с; Δx – толщина конечного элемента при разбиении расчетной области, см; $C_i^{\text{ст}}$, $C_i^{\text{ч}}$ – концентрация i -го легирующего элемента в стали и чугуне соответственно, кг/см³; D – коэффициент диффузии углерода в расплаве чугуна, см²/с.

Применяемый при моделировании диффузионных процессов подход обеспечивает достоверные результаты по распределению легирующих элементов только до начала кристаллизации рабочего слоя и переходной зоны. Это связано с тем, что при кристаллизации рабочего слоя происходит перераспределение легирующих элементов между твердой и жидкой фазами, а также их накопление в расплаве, где, наряду с установившимися градиентами концентрации между сталью и чугуном, будут возникать дополнительные локальные градиенты концентраций. Кроме этого, моделирование диффузионных про-

цессов в линейном приближении может быть неадекватно ввиду того, что возникающая гетерофазная структура имеет сложный объемный характер, а количество твердой и жидкой фаз в процессе кристаллизации постоянно меняется.

Поэтому моделирование распределения элементов в переходной зоне ограничились интервалом времени от момента заливки чугуна до начала его кристаллизации в предположении, что химический состав зоны контакта в момент начала кристаллизации рабочего слоя должен оказывать существенное влияние на дальнейшее перераспределение элементов при охлаждении биметаллических отливок.

Закономерности влияния химического состава и температуры на диффузию углерода, кремния, марганца, хрома и молибдена в сталях и чугунах определяли по экспериментальным данным, приведенным в работах [4-7].

Линеаризацию зависимостей проводили по уравнению

$$\ln D = \ln D_0 - Q/(R \cdot T), \quad (23)$$

где D_0 – предэкспоненциальный множитель, $\text{см}^2/\text{с}$; Q – энергия активации процесса диффузии, Дж/моль ; R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; T – температура, К .

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры диффузии углерода, кремния, марганца, хрома и молибдена в сталях и чугунах

Элемент	$\ln D_0$	Q/R	$R_{\text{кор}}$
C	$-9,21 + \ln(1 + 0,1276 \cdot \text{Si} + 0,0073 \cdot \text{Mn} - 0,0137 \cdot \text{Cr} - 0,0242 \cdot \text{Mo})$	$14,9 - 0,299 \cdot C - 0,003 \cdot (T - 273)$	0,793
Si	$-9,21 + \ln(1 + 0,3 \cdot C + 0,06 \cdot \text{Cr})$	$19,6 - 0,051 \cdot \text{Si} - 0,006 \cdot (T - 273)$	0,988
Mn	$-13,43 + \ln(1 - 0,09 \cdot C + 0,001 \cdot \text{Si} + 0,015 \cdot \text{Mn} + 0,0328 \cdot \text{Cr})$	10572	0,784
Cr	$-15,136 + \ln(1 - 0,114 \cdot C + 0,5 \cdot \text{Si} - 0,02 \cdot \text{Mn} + 0,008 \cdot \text{Cr})$	8080	0,985
Mo	-18,334	15746	0,963

Для экспериментальной проверки установленных закономерностей методом последовательной заливки расплавов в жидкостекольные формы через автономные литниковые системы изготовили опытные биметаллические отливки «Молоток» массой 21,4 кг и соотношением толщин рабочего слоя и металла-основы 1,0:2,5. Температура заливки стали составляла 1580 °С, температура заливки чугуна – 1350 °С. Эскиз биметаллической отливки и место вырезки образцов размером $\varnothing 15 \times 13$ мм для исследования распределения элементов в переходной зоне показаны на рис. 3.

Химический состав металла-основы и рабочего слоя биметаллической отливки «Молоток» приведен в табл. 2.

В месте вырезки образцов (рис. 3) устанавливали термопару ТПП (ГОСТ 3044-84) для определения температуры в зоне контакта слоев биметаллической отливки при ее охлаждении. Температуру регистрировали на компьютере и записывали в файл при помощи электронного модуля WAD-AIK-BUS и преобразователя WAD-LAN/COM-BUS. Содержание углерода, кремния, марганца, хрома

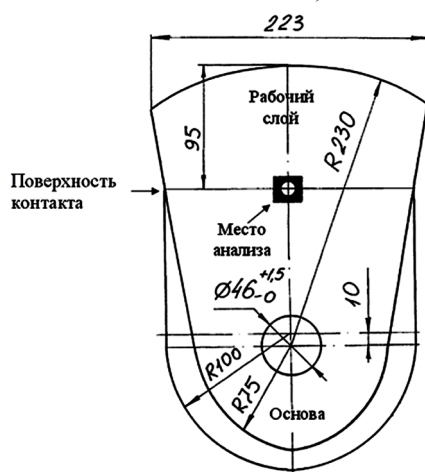


Рис. 3. Эскиз опытной биметаллической отливки «Молоток» и место вырезки образцов для исследования распределения элементов в переходной зоне

Таблица 2. Химический состав металла-основы и рабочего слоя биметаллической отливки «Молоток»

Биметаллическая пара	Содержание элементов, % мас.				
	C	Si	Mn	Cr	Mo
Сталь 25Л (металл-основа)	0,24	0,31	0,62	0,01	0
Чугун 300X12M2 (рабочий слой)	3,10	0,50	0,85	12,70	2,14

и молибдена в переходном слое и прилегающих к нему областях стали и чугуна определяли в микрошлифах, изготовленных из опытных образцов, на электронном растровом анализаторе РЭММА-102.

Результаты моделирования и экспериментальные значения температуры в переходном слое показаны на рис. 4.

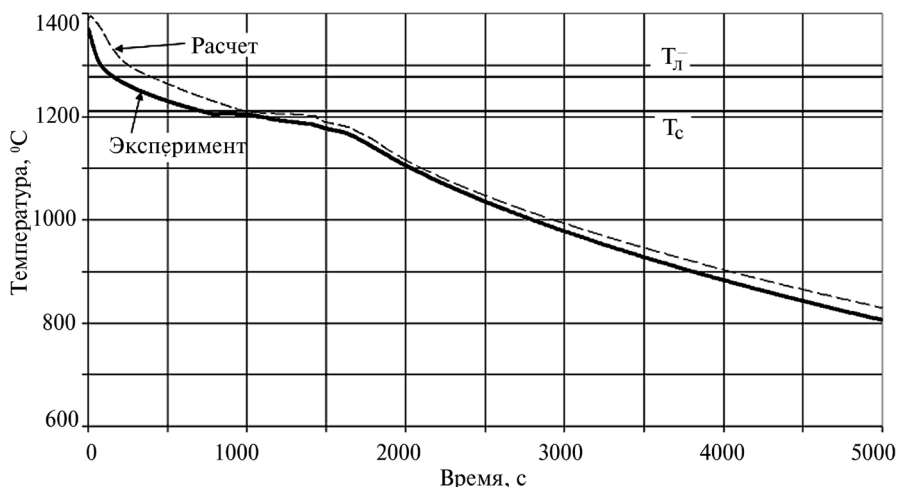


Рис. 4. Изменение температуры переходного слоя при охлаждении биметаллической отливки после заливки рабочего слоя

Анализ данных, приведенных на рис. 4, показал, что разработанная методика с вероятностью 99 %, средней погрешностью аппроксимации 1,03 % и коэффициентом корреляции 0,995 позволяет моделировать изменение температуры при охлаждении биметаллической отливки. Расхождение расчетных и экспериментальных данных связано с тем, что при контакте расплавов металла-основы и рабочего слоя с формой происходит удаление диспергирующей влаги, находящейся в жидком стекле. Этот процесс происходит с поглощением теплоты, вследствие чего эффективная теплоемкость формы заметно увеличивается. Также увеличивается и эффективная теплопроводность формы, что объясняется направленным истечением испарившейся влаги в менее горячие участки формы. Указанные факторы повышают скорость охлаждения биметаллической отливки до момента удаления влаги в контактирующих с ней слоях формы. Рассчитанная температура переходной зоны после окончания заливки рабочего слоя также несколько выше экспериментальной, что связано с инертностью измерительных термопар, а также повышенной скоростью охлаждения залитого металла-основы.

Из рис. 4 видно, что на экспериментальной и расчетной температурных кривых при температуре ликвидуса рабочего слоя наблюдается плавный излом, который соответствует началу выделения аустенита. Скорости охлаждения, установленные экспериментальным и расчетным путем, через 200 с после окончания заливки рабочего слоя практически совпадают.

Анализ температурного поля переходной зоны показал, что разность температур на ее противоположных сторонах в начальный момент контакта расплава чугуна с затвердевшей

Новые методы и прогрессивные технологии литья

стальной основой составляет от 0,5 до 2 °С. В течение 200 с эта разность уменьшается практически до нуля. Таким образом, при расчете содержания элементов в переходном слое приняли, что температура в зоне контакта слоев изменяется со временем, но одинакова для всех точек расчетной области.

Результаты моделирования и экспериментальные значения содержания элементов в переходном слое показаны на рис. 5, 6.

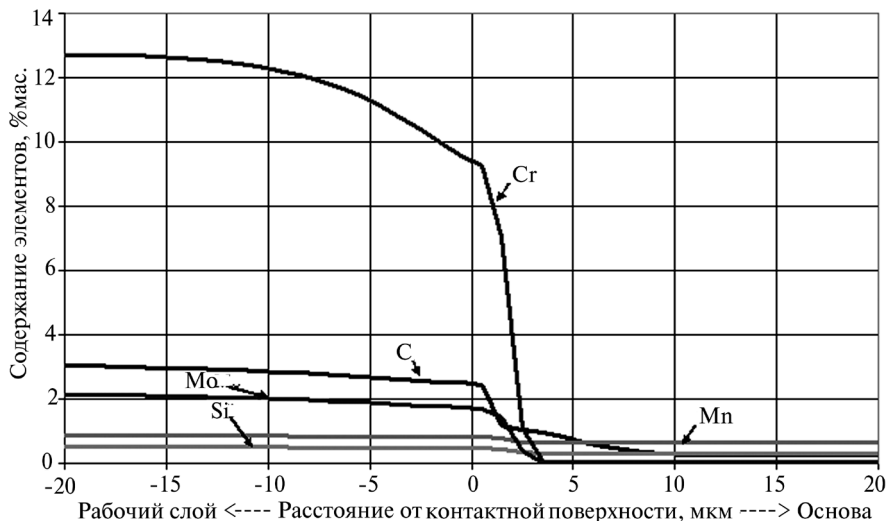


Рис. 5. Расчетные значения распределения элементов между металлом-основой и рабочим слоем перед началом кристаллизации чугуна

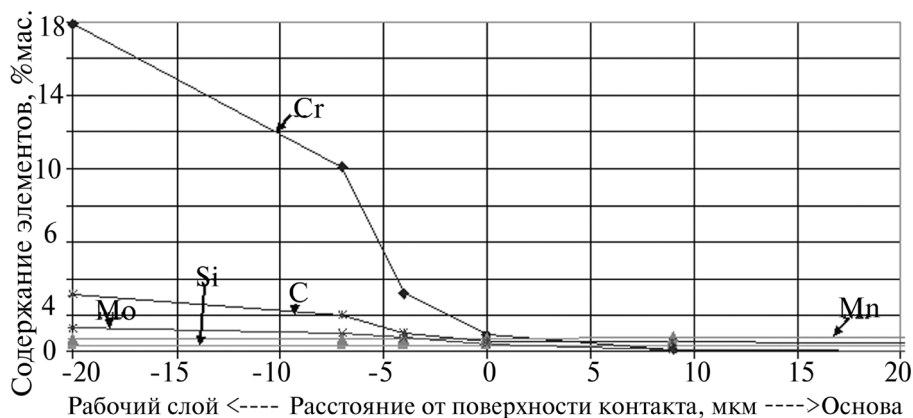


Рис. 6. Экспериментальные значения распределения элементов между металлом-основой и рабочим слоем после охлаждения биметаллической отливки до комнатной температуры

Анализ полученных данных показывает, что предложенная методика моделирования позволяет с вероятностью 95 % прогнозировать распределение углерода, кремния, марганца, хрома и молибдена в переходном слое биметаллических отливок. При этом коэффициент корреляции между экспериментальными и рассчитанными значениями составляет: для углерода - 0,717; кремния - 0,721; марганца - 0,746; хрома - 0,720; молибдена - 0,742. Критическое значение коэффициента корреляции - 0,570. Следовательно, химический состав зоны контакта перед началом кристаллизации рабочего слоя оказывает существенное влияние на конечное распределение элементов в переходном слое биметаллических отливок.

Результаты выполненных исследований показывают, что предложенная методика моделирования позволяет получать адекватные данные по температурным полям биметаллических отливок и распределению элементов в переходном слое.

Для повышения точности расчета распределения элементов необходимо моделирование массопереноса в процессе кристаллизации и последующего охлаждения, сопровождаемого фазовыми превращениями, путем построения статистических физико-математических моделей.



Список литературы

1. Поттер Д. Вычислительные методы в физике. – М.: Наука, 1978. – 392 с.
2. Гиришович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. - М.; Л.: Машиностроение, 1966. - 562 с.
3. Справочник по чугунному литью /Под ред. Н. Г. Гиришовича. - Л.: Машиностроение, 1978. - 761 с.
4. Арсентьев П. П., Коледов Л. А. Металлические расплавы и их свойства. - М.: Металлургия, 1976. - 376 с.
5. Андронов В. Н., Чекин Б. В., Нестеренко С. В. Жидкие металлы и шлаки: Справочник. - М.: Металлургия, 1977. - 127 с.
6. Лепинских Б. М., Кайбичев А. В., Савельев Ю. А. Диффузия элементов в жидких металлах группы железа. - М.: Наука, 1974. - 192 с.
7. Ершов Г. С., Майборода В. П. Диффузия в металлических расплавах. - Киев: Наук. думка, 1990. - 224 с.

Поступила 11.02.2009

УДК 621.74.045

Л. П. Вишнякова, Н. Намдармогадам*

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Компания, "Azarin Nam Co", Иран

ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОТЛИВОК ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Рассмотрено влияние плотности пенополистироловой модели, скорости подъема металла в форме и температуры заливаемого металла на качество поверхности отливки при литье по газифицируемым моделям.

Розглянуто вплив щільності пінополістиролової моделі, швидкості підйому металу в формі та температури металу, що заливається, на якість поверхні виливків при литті за моделями, що газифікуються.

It was considered the inherence of density of foamy polystyrene model, shed of fill the metal in mould and temperature of the metal on the quality of the casting surface by Lost Foam Process

Ключевые слова: пенополистирол, газифицируемые модели, деструкция, противопожарные покрытия, дефекты.

Формирование поверхностного слоя отливок при литье по газифицируемым моделям происходит под влиянием продуктов разложения пенополистироловой модели. Как известно, пенополистирол при заливке формы металлом разлагается на газообразную, жидкую и твердую фазы [1]. На качество поверхности отливок из чугуна наибольшее влияние оказывает жидкая фаза продуктов деструкции модели [2], состоящая из тяжелых углеводородов, не летучих при данной температуре.