



Mathematical model and results of calculation analysis on determination of influence of "soft squeezing" on degree of axial chemical heterogeneity (distribution of carbon, sulfur and manganese) in billets, produced by means of continuous casting, are given.

Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, НПП «ПЛАТОН», В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, ПИИ «ЕВРОСТАЛЬ ЛТД»
(УКРАИНА), И. А. ТРУСОВА, Н. Л. МАНДЕЛЬ, БНТУ

УДК 621.746

ВЛИЯНИЕ МЯГКОГО ОБЖАТИЯ НА СТЕПЕНЬ ОСЕВОЙ ХИМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК. СООБЩЕНИЕ 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе [1] выполнен анализ существующих методов промышленной реализации метода «мягкого обжатия» при получении непрерывнолитой заготовки в условиях МНЛЗ. В продолжение исследований в настоящей статье разработана математическая модель процесса воздействия «мягкого обжатия» на степень осевой химической неоднородности (ОХН) в непрерывнолитой заготовке исходя из того, что при этом происходит подавление выпучивания оболочки непрерывнолитой заготовки на финишной стадии ее затвердевания.

Предположим, что величина выпучивания оболочки зависит от времени и координаты X , направленной в сторону, противоположную перемещению заготовки. В общем случае эта зависимость может быть представлена соотношением

$$d(X, t) = \sum_k a_k W_k(X) F_k(t) \text{ при } k = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Здесь координатная часть $W_k(X)$ должна удовлетворять очевидному условию $W_k(X) = 0$ в точках контакта опорных роликов с поверхностью оболочки заготовки (при $X = L_j$), а функция времени $F_k(t)$ зависит от конструктивного оформления устройства «мягкого обжатия». В простейшем случае координатная функция может быть записана следующим образом:

$$W(X) = 1 - \cos\left(\frac{2\pi X}{L_0}\right).$$

Тогда выражение (1) для выпучивания примет вид

$$d(X, t) = \delta(t) \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi X}{L_0}\right) \right], \quad (2)$$

где выражение $\delta(t) = \sum_k a_k F_k(t)$ представляет собой временную функцию, вид которой зависит от конструкции устройства «мягкого обжатия».

Для дальнейших расчетов используется выражение функции $\delta(t)$:

$$\delta(t) = \begin{cases} d_0 = \text{const} & \text{при } 0 \leq t \leq t_1, \\ d_0 \exp\left[-B\left(\frac{t-t_1}{t_k-t_1}\right)\right] & \text{при } t_1 \leq t \leq t_k, \end{cases} \quad (3)$$

где $t_k = \frac{L_0}{V_0}$ – время перемещения контрольного

сечения заготовки в пределах расстояния между опорными роликами в зоне «мягкого обжатия»; V_0 – скорость непрерывного литья.

Распределение концентрации примеси в незатвердевшей части заготовки зависит от течения расплава и определяется при совместном решении уравнений конвективной диффузии и движения расплава в дендритной сетке

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(-D \nabla C) + C \vec{U} &= 0, \\ \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} - \eta \nabla^2 \vec{u} + (\eta/k_p) \vec{u} + \nabla p &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Решение уравнения конвективной диффузии проводится при задании начальной концентрации примеси в сечении расчетного участка заготовки, равной C_0 .

При решении уравнения движения расплава (уравнения Бринкмана) необходимо учитывать наличие отрицательного давления (разрежения) в зоне усадки на оси симметрии либо в средней плоскости заготовки.

Способ оценки импульса отрицательного давления в зоне усадки затвердевающей заготовки осуществляется с использованием формулы Флемингса

$$\Delta P = \frac{\beta}{1-\beta} \frac{\eta L^2}{2k_p} \left(-\frac{d\Psi}{dT} \right) V_{\text{охл}}(t),$$

где два последних множителя в правой части представляют собой темп кристаллизации и локальную скорость охлаждения в зоне усадки затвердевающей заготовки соответственно; L – протяженность зоны усадки; β – коэффициент объемной усадки; k_p – коэффициент проницаемости дендритной сетки.

Определение локальной скорости охлаждения в зоне усадки базируется на решении уравнения нестационарной теплопроводности для затвердевающей заготовки

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (\lambda \cdot \text{grad } T) + \rho L \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (5)$$

при задании граничных условий, соответствующих режиму охлаждения заготовки на участке «мягкого обжатия».

Таким образом, в общем случае характер макросегрегации в сечении заготовки при воздействии «мягкого обжатия» определяется совместным решением уравнений (4), (5) с учетом деформации оболочки заготовки и возникновения отрицательного давления (разрежения) в зоне усадки.

Ниже приведены примеры решения поставленной задачи для заготовок квадратного поперечного сечения (блужков) при варьировании параметров d_0 и B , входящих в формулу (3) для максимального выпучивания оболочки. Локальная скорость охлаждения в зоне усадки на оси симметрии блужков определяется при решении уравнения теплопроводности (5) при задании на всех четырех гранях блужков граничного условия конвективного теплообмена:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{пов}} = \alpha (T - T_s), \quad (6)$$

где α и T_s (коэффициент теплоотдачи и температура окружающей среды) приняты известными и неизменными параметрами.

Решение уравнения теплопроводности (5) осуществляется численным методом конечных элементов, причем результаты решения фиксируются для трех контрольных точек (рис. 1). Задание границ ин-

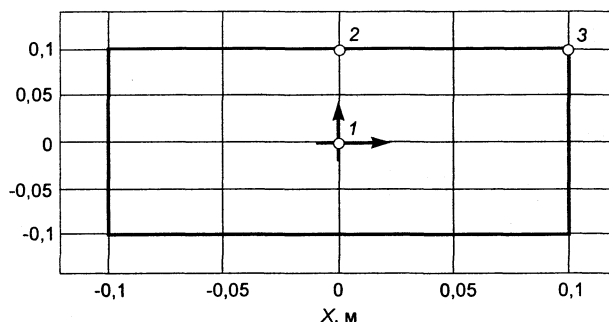


Рис. 1. Схема расположения контрольных точек 1, 2 и 3 в поперечном сечении затвердевающего стального блужка

тервала кристаллизации (температур ликвидуса и солидуса) выполнено для сплава Fe + 0,9% C. Размеры поперечного сечения блужков $2A \times 2B$ принимали равными 200, 300 и 400 мм, теплофизические свойства стали: $\rho = 7000 \text{ кг/м}^3$, $c_p = 650 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$, $\lambda = 35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, $L = 2,64 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$, температура окружающей среды равна 350 К, коэффициент теплоотдачи α равен 120 и 300 Вт/(м²·К). На рис. 2, 3 в качестве примера приведены некоторые результаты расчетов. Значение $\alpha = 120 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$ соответствует (в первом приближении) радиационному теплообмену на поверхности заготовки, значение $\alpha = 300 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$

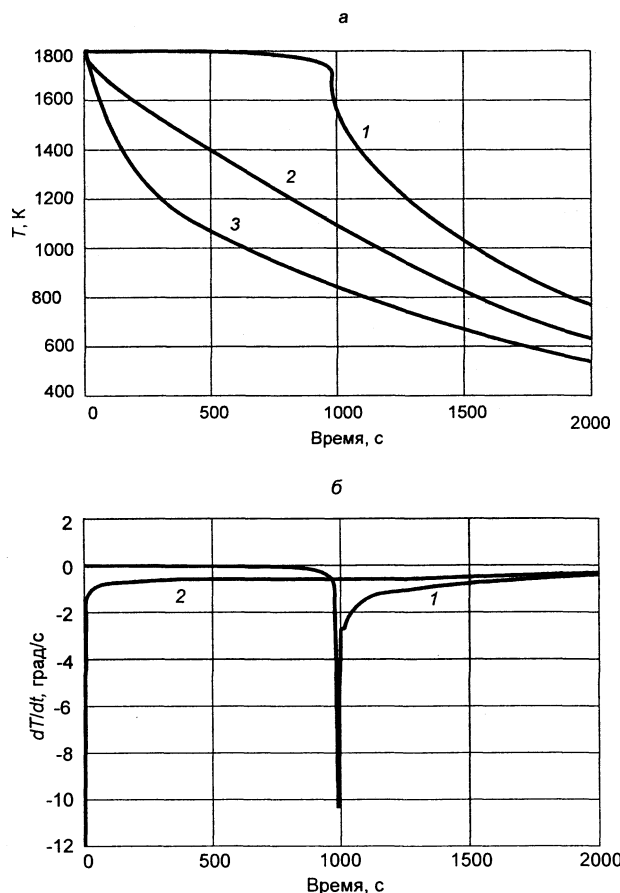


Рис. 2. Изменение температур (а) и скоростей охлаждения (б) в контрольных точках сечения блужка размерами $2A \times 2B = 200 \text{ мм}$ при задании $\alpha = 300 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$, $T_s = 350 \text{ К}$: 1–3 – контрольные точки

позволяет учесть повышение интенсивности наружного теплообмена за счет попадания охлаждающей воды на поверхность заготовки. Результаты расчетов показывают, что в момент окончания затвердевания скорость охлаждения на оси заготовки претерпевает резкое возрастание, причем достигаемый максимум скорости охлаждения существенно зависит от размера поперечного сечения заготовки и коэффициента теплоотдачи.

Для дальнейшего применения найденной зависимости скорости охлаждения заготовки при оценке импульса отрицательных давлений в зоне усадки используется аналитическое (эмпирическое) соотношение:

$$V_{\text{охл}} = \begin{cases} A_1 \exp \left[-6,6 \left(\frac{t_3 - t}{t_3 - t_1} \right)^2 \right] & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2, \\ V_m \exp \left[-B_1 \left(\frac{t - t_2}{t_3 - t_2} \right)^{0,25} \right] & \text{при } t_2 \leq t \leq t_3, \end{cases} \quad (7)$$

где A_1 , B_1 и V_m – эмпирические коэффициенты, определяемые при сравнении аналитической формулы (7) с численными расчетами; t_1 , t_2 и t_3 – значения моментов времени, соответствующих началу процесса охлаждения, моменту окончания затвердевания и полной длительности расчетного интервала времени.

Зная выражение для скорости охлаждения $V_{\text{охл}}(t)$, можно определить изменение разрежения в зоне усадки затвердевающей заготовки по формуле

$$\Delta P(t) = \frac{\beta}{1 - \beta} \frac{A \eta L^2}{2k_p \delta T} V_{\text{охл}}(t), \quad (8)$$

где $A = 3,3852$; $\delta T = T_{\text{лик}} - T_{\text{сол}}$ – интервал кристаллизации изучаемого сплава.

Следующий шаг постановки задачи состоит в задании скорости течения расплава в двухфазной зоне затвердевающей заготовки в соответствии с формулой

$$V_s(X, t) = \pi \frac{\delta(t) V_0}{L_0} \sin \left(\frac{2\pi}{L_0} X \right). \quad (9)$$

Определение значений $V_s(X, t)$ и $\Delta P(t)$ открывает возможности интегрирования системы уравнений конвективной диффузии и движения жидкой фазы в незатвердевшей части непрерывнолитой заготовки.

Ниже приведены результаты расчетов осевой химической неоднородности в расчетном элемен-

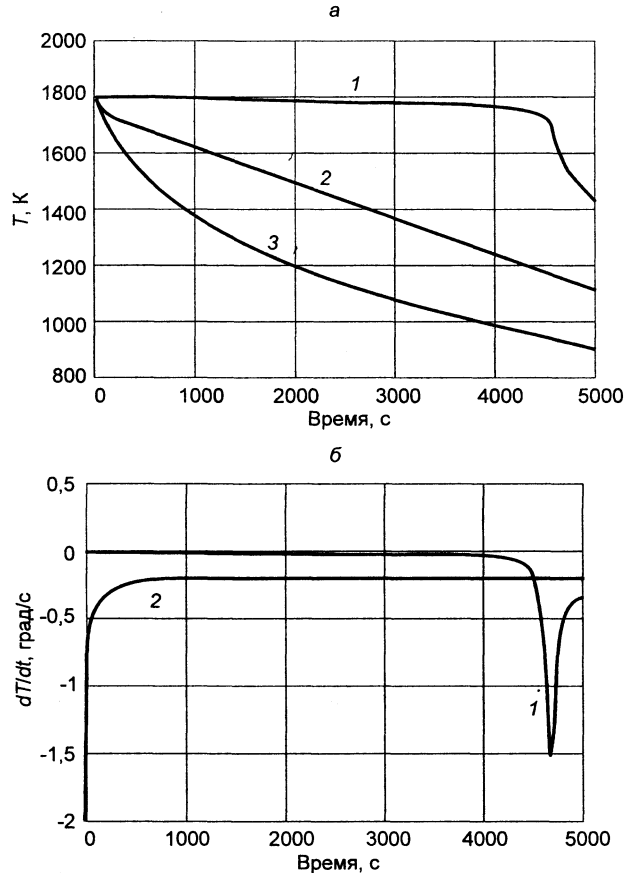


Рис. 3. Изменение температур (а) и скоростей охлаждения (б) в контрольных точках сечения бруса размерами $2A \times 2B = 400$ мм при задании $\alpha = 120$ Вт/(м²·К), $T_s = 350$ К: 1–3 – контрольные точки

те непрерывнолитой заготовки, расположенном между парой соседних опорных роликов, расстояние между которыми равно $L_0 = 0,4$ м.

В расчетах использовали две схемы задания структурных зон по сечению заготовки толщиной $2L_1 = 0,2$ м.

В соответствии с первой схемой сечение заготовки заполнено двухфазной зоной с переменной проницаемостью дендритной сетки

$$k_p = k_0 + (k_L - k_0)(Y/L_1)^2$$

при задании $k_0 = 10^{-12}$ м², $k_L = 10^{-8}$ м².

Согласно второй схеме, расчетный элемент разделен на две структурные зоны – твердую корку толщиной Y_s с исчезающе малой проницаемостью (10^{-20} м²), расположенную у охлаждаемой поверхности заготовки, и двухфазную зону толщиной $L_1 - Y_s$, заполняющую центральную часть заготовки, с проницаемостью $k_p = 10^{-8}$ м².

Кроме того, для второй расчетной схемы учитывали существенное различие коэффициентов диффузии компонентов сплава в обеих зонах: для твердой корки принимали $D_s(C) = 10^{-13}$ м²/с, для двухфазной зоны $D_L(C) = 5 \cdot 10^{-9}$ м²/с. Результаты

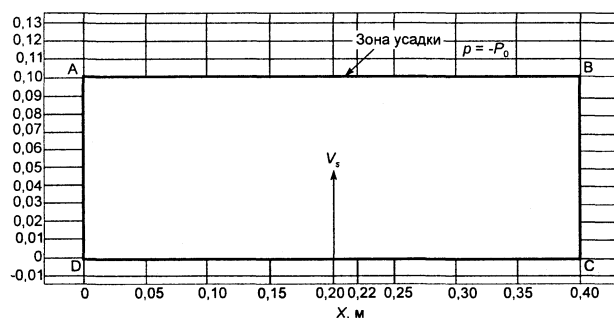


Рис. 4. Схема расчетного элемента заготовки, расположенного между парой соседних роликов в зоне «мягкого обжарки», к первой серии расчетов

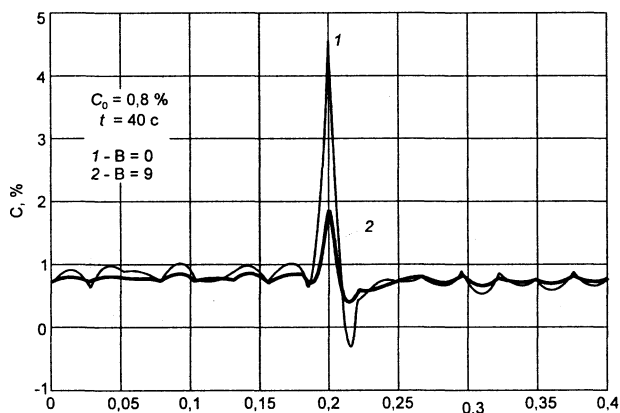


Рис. 6. Распределение углерода в средней плоскости заготовки толщиной $2A = 200$ мм при «мягком обжарке» (2) и без него (1); начальная концентрация углерода $C_0(C) = 0,8\%$

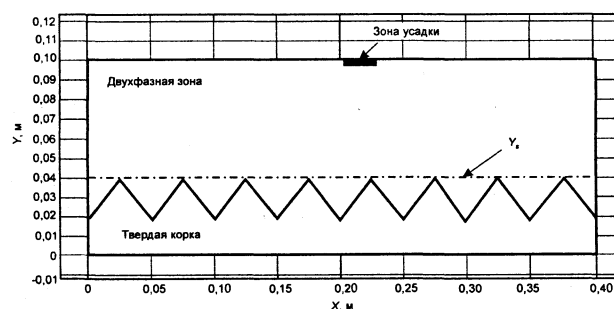


Рис. 8. Схема расчетного элемента заготовки, расположенного между парой соседних роликов в зоне «мягкого обжарки», для второй серии расчетов

расчетов по обжимным расчетным схемам приведены на рис. 4–12.

На рис. 4 показана схема задания расчетного элемента заготовки, используемая при выполнении первой серии расчетов. На схеме указано расположение усадочной зоны в средней плоскости заготовки (при $X = 0,2 - 0,22$ м, $Y = L_1 = 0,2$ м), где задано разрежение $p = -P_0(t)$. На нижней поверхности расчетного элемента DC (при $X = 0 - 0,4$ м, $Y = 0$) задано распределение скорости $V_s(X, t)$ в соответствии с формулой (9) при определенной скорости разливки V_0 и графике изменения выпучивания оболочки согласно формуле (3). На прочих

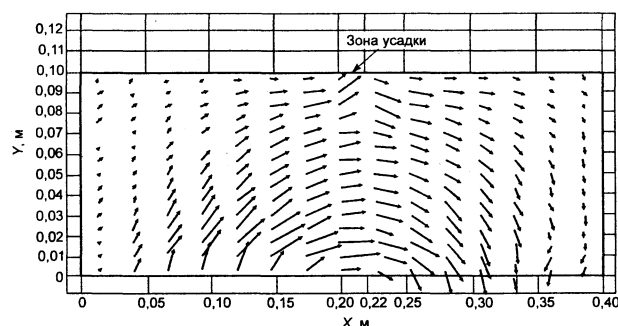


Рис. 5. Картина течения расплава в расчетном элементе двухфазной зоны при задании $d_0 = 4$ мм, $V_0 = 0,01$ м/с

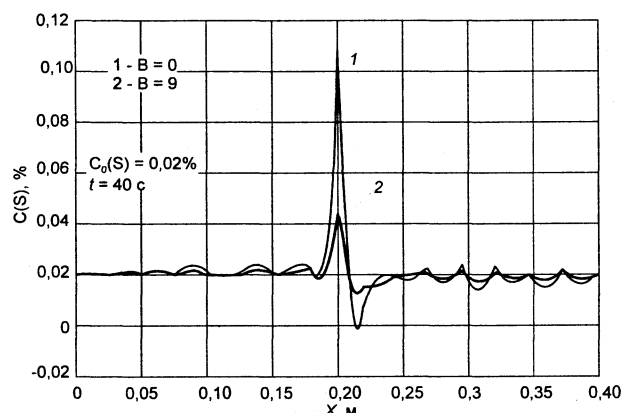


Рис. 7. Распределение серы в средней плоскости заготовки толщиной $2A = 200$ мм при «мягком обжарке» (2) и без него (1); начальная концентрация серы $C_0(S) = 0,02\%$

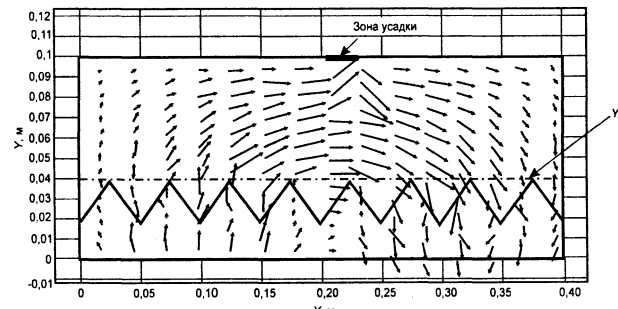


Рис. 9. Картина течения расплава в расчетном элементе двухфазной зоны при задании $d_0 = 4$ мм, $V_0 = 0,01$ м/с, $V_s = 0,04$ м

границах расчетного элемента использовали предположение о прилипании потока расплава к границам соседних участков заготовки. Решение уравнения конвективной диффузии осуществляется при задании некоторой исходной концентрации компонента сплава C_0 и предположении об отсутствии массообмена расплава с соседними участками затвердевающей заготовки.

На рис. 5 приведена картина течения расплава в пределах двухфазной зоны. Из рисунка видно, что в первой половине расчетного элемента (при $X = 0 - 0,2$ м) поток расплава движется снизу вверх (вдоль положительного направления оси Y), а во

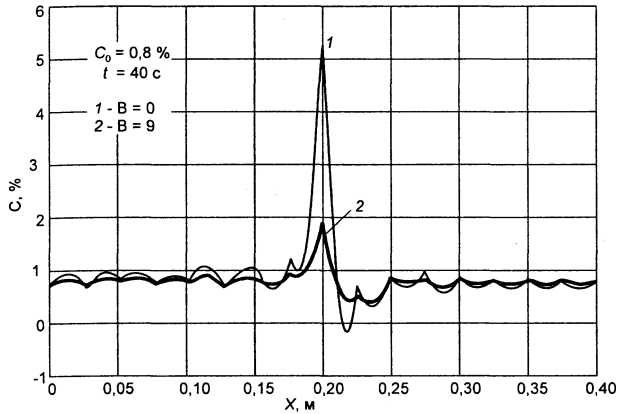


Рис. 10. Распределение углерода в средней плоскости заготовки толщиной $2A = 200 \text{ мм}$ при «мягком обжатии» (2) и без него (1); начальная концентрация углерода $C_0(C) = 0,8\%$, $d_0 = 4 \text{ мм}$, $Y_s = 0$

второй половине расчетного элемента (при $X = 0,2 - 0,4 \text{ м}$) направление потока меняется на обратное. Движение расплава сопровождается перераспределением примеси по объему двухфазной зоны, при котором в зону усадки под влиянием разрежения втягивается некоторый избыток растворимой примеси. На рис. 6 показано распределение основного компонента сплава – углерода в средней плоскости заготовки (при $Y = 0,1 \text{ м}$) для заключительного момента перемещения контрольного сечения на пути X между соседними роликами при задании скорости разливки $V_0 = 1,0 \text{ см/с}$. Решение системы уравнений (4) выполнено численным методом конечных элементов при задании следующих физических свойств затвердевающего сплава: $\rho = 7000 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 0,0062 \text{ Па}\cdot\text{с}$ при исходной концентрации углерода $C_0(C) = 0,8\%$ (выражение коэффициента проницаемости для первой серии расчетов приведено выше).

В расчетах принимали, что в начальный период времени при $0 \leq t \leq t_1 = 5 \text{ с}$ величина выпучивания сохранялась неизменной и равной 4 мм и лишь при $t \geq 5 \text{ с}$ под воздействием «мягкого обжатия» она уменьшалась по экспоненте в соответствии с формулой (3). Тонкой линией на рис. 6 показано распределение углерода при задании $B = 0$, т. е. при неизменной величине начального выпучивания $\delta(0) = d_0 = 4 \text{ мм}$, толстой линией – распределение углерода в момент $t = t_k = 40 \text{ с}$ с учетом «мягкого обжатия» при задании коэффициента $B = 9$ в формуле (3).

Из рисунка видно, что учет «мягкого обжатия» по изложенному выше способу приводит к существенному снижению максимальной концентрации углерода в усадочной зоне для момента $t = t_k$ с 4,5 до 1,9% С, т. е. более чем в 2,3 раза.

Аналогичные расчеты проведены для серы при исходной концентрации, равной 0,02%, и марган-

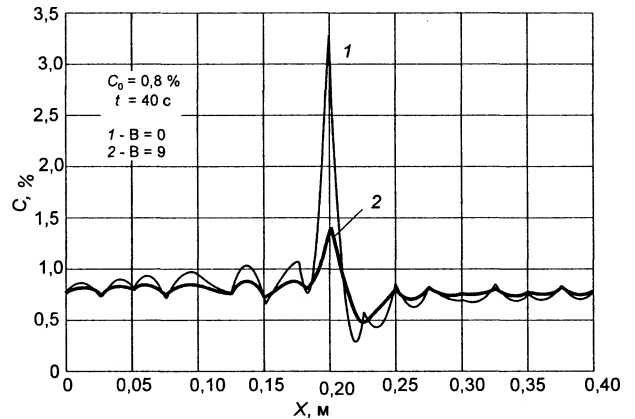


Рис. 11. Распределение углерода в средней плоскости заготовки толщиной $2A = 200 \text{ мм}$ при «мягком обжатии» (2) и без него (1); начальная концентрация углерода $C_0(C) = 0,8\%$, $d_0 = 2 \text{ мм}$, $Y_s = 0,04 \text{ м}$

ца с начальной концентрацией 2%. Для этих элементов коэффициенты диффузии в жидкой фазе принимали равными $D_L(S) = 3,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$, $D_L(\text{Mn}) = 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ в соответствии с данными [2]. Результаты расчетов по определению степени ОХН для серы приведены на рис. 7 при задании коэффициента $B = 0$ и 9. Из рисунка видно, что степень снижения уровня ОХН для серы (в 2,2–2,4 раза) практически не отличается от снижения уровня ОХН для углерода при учете воздействия «мягкого обжатия» на оболочку заготовки. Аналогичные результаты наблюдаются для марганца.

Распределение структурных зон для второй серии расчетов уровня осевой химической неоднородности с учетом воздействия «мягкого обжатия» на затвердевающую заготовку показано на рис. 8. Изломанной линией указана граница твердой корки, в пределах которой проницаемость дендритной сетки принята исчезающе малой, и коэффициент диффузии компонентов сплава примесей на не-

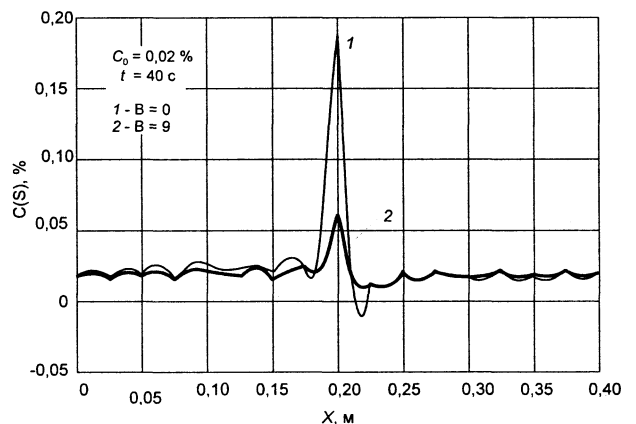


Рис. 12. Распределение серы в средней плоскости заготовки толщиной $2A = 200 \text{ мм}$ при «мягком обжатии» (2) и без него (1); начальная концентрация серы $C_0(S) = 0,02\%$, $d_0 = 4 \text{ мм}$, $Y_s = 0,04 \text{ м}$

сколько порядков ниже, чем в пределах двухфазной зоны. В ходе расчетов варьировали толщину твердой корки, принимая значение границы $Y = Y_s = 0, 0,02$ и $0,04$ м при задании параметров $V_0 = 1,0$ см/с, $\delta(0) = d_0 = 4$ мм, $l_1 = 5$ с, $l_k = 40$ с.

Результаты второй серии расчетов приведены на рис. 9 – 12.

На рис. 9 показана картина течения расплава в двухфазной зоне заготовки при задании толщины твердой корки $Y_s = 0,04$ м. На рис. 10 в качестве примера приведены результаты влияния толщины твердой корки на распределение углерода в средней плоскости заготовки с учетом воздействия «мягкого обжатия» (толстые линии) и без него (тонкие линии). Расчеты макросегрегации с учетом «мягкого обжатия» (при задании $B = 9$) приводят к максимальным значениям концентрации углерода, меньшим в 2,7–3,0 раза, по сравнению с соответствующими значениями, полученными

при задании $B = 0$. На рис. 11 показано распределение углерода в средней плоскости заготовки, полученное при задании начального выпучивания оболочки $\delta(0) = 2$ мм. Анализ результатов показывает, что увеличение начального выпучивания в 2 раза (от 2 до 4 мм) приводит к росту максимальной концентрации углерода в усадочной зоне от 3,25 до 7,5%, т. е. в 2,3 раза. Аналогичные расчеты по влиянию начального выпучивания выполнены для серы с начальной концентрацией $C_0(S) = 0,02\%$ (некоторые результаты приведены на рис. 12). Анализ расчетных данных показывает, что и в случае макросегрегации серы увеличение начального выпучивания оболочки от 2 до 4 мм приводит к росту максимальной концентрации данной примеси в 2,3 раза (от 0,81 до 1,87%). Характер снижения концентрации серы в усадочной зоне под влиянием «мягкого обжатия» носит такой же характер, как в случае макросегрегации углерода.

Литература

1. Самойлович Ю. А., Тимошпольский В. И. Влияние мягкого обжатия на степень осевой химической неоднородности при производстве непрерывнолитых заготовок. Сообщение 1. Анализ существующих методов промышленной реализации и расчета режимов мягкого обжатия // Литье и металлургия. 2008. № 3. С. 99–105.
2. Schwardtfege K. Influence of solidification rate on the microsegregation and interdendritic precipitation of manganese-sulphide inclusions in a steel containing manganese and carbon. Archive f. d. Eisenhüttenwesen. 1970. Bd. 41. H.9. S. 923–937.