

УДК: 621.746.584

Влияние геометрии слитка на объем осевой рыхлости в нем

А. Н. Ромашкин^а, А. Н. Мальгинов^б, Д. С. Толстых^с,
И. А. Иванов^д, В. С. Дуб^е

Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение
«Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения»,
Россия, 115088, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4

E-mail: ^а an_romashkin@cniitmash.ru, ^б annalginov@mail.ru, ^с tolstyh_d@mail.ru,
^д ia.ivanoff@gmail.com, ^е oms@cniitmash.ru

Получено 22 сентября 2014 г.,
после доработки 25 ноября 2014 г.

На основании компьютерного моделирования затвердевания слитка массой 65 т из стали 10ГН2МФА изучено влияние изменения конусности слитка и отношения его высоты к среднему диаметру на объем осевой рыхлости.

Ключевые слова: слиток, разливка, геометрия, осевая рыхлость, физическая неоднородность

The ingot geometry effect on the axial shrinkage

A. N. Romashkin, A. N. Malginov, D. S. Tolstyh, I. A. Ivanov, V. S. Doub

Public corporation Scientific and Production Association «Central Research Institute of Machine Building Technology», 4 Sharikopodshipnikovskaya st., Moscow, 115088, Russia

Abstract. — There was studied the effects of ingot geometry changes on axial shrinkage. The investigation was carried out on the basis of 65-t ingot solidification computer simulation.

Keywords: ingot casting, geometry, axial shrinkage

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 107–112 (Russian).

Введение

В ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» в ходе многолетнего выполнения программ по проектированию технологии производства крупнейших в стране слитков был разработан системный подход к созданию технологии производства крупных кузнечных слитков, базирующийся на прогностических моделях, разработанных на основании математической обработки экспериментальных данных, накопленных при проведении лабораторных и промышленных экспериментов с термографированием остывания слитков различной массы и их металлографического исследования.

Обобщением этого опыта стал программный комплекс для моделирования процессов затвердевания «Крупный слиток». Преимуществом данной программы по сравнению с существующими является возможность учета особенностей затвердевания больших объемов металла, в первую очередь, перераспределения примесей, оказывающих существенное влияние на химическую, физическую и структурную неоднородности слитка и возможность количественной оценки объема пор в слитке. Адекватность получаемых в программе результатов подтверждена сопоставлением с результатами экспериментальных исследований.

Особенности программы «Крупный слиток»

Заложенный в программу «Крупный слиток» алгоритм расчета динамики охлаждения слитка основан на решении дифференциального уравнения стационарной теплопроводности:

$$V \cdot \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\gamma \operatorname{grad}(T)) + q_v, \quad (1)$$

где V — объем элементарной ячейки, м³; q_v — теплота кристаллизации (учитывается при $T = [T_L; T_S]$), Вт; T — температура, К; ρ — плотность, кг/м³; C — теплоемкость, Дж/(кг·К); τ — время, с.

Для расчета перераспределения примеси использована модель неравновесной кристаллизации Шейла. В соответствии с данной моделью значение концентрации примеси в твердой фазе может быть рассчитано по выражению (2).

$$CS_{(i)} = k_i \cdot C_{(i)} / [1 + (k_i - 1) \cdot \eta_S], \quad (2)$$

где $CS_{(i)}$ — концентрация примеси i в твердой фазе, %; k_i — равновесный коэффициент распределения примеси i , доли ед.; $C_{(i)}$ — исходная концентрация примеси в расплаве, %; η_S — доля твердой фазы, доли ед.

Основой для создания математической модели расчета параметров зоны шнуров внецентренной ликвации является теория формирования шнуров по механизму зонной плавки с температурным градиентом [Дуб, 1980]. Основу алгоритма расчета составляет вероятностная модель. Расчет основывается на вычислении на каждом шаге теплофизических характеристик процесса затвердевания и на основании этого определения вероятности образования шнуров. Для расчета вероятности образования шнуров используется система уравнения (3)–(6) [Копелиович, 1990].

$$Z_0 = \frac{A \cdot \Delta T_{L-S} / B_0 + B \cdot \varepsilon \cdot (1 - \alpha) - G}{[(B \cdot (1 - \alpha) \cdot \varepsilon - G)^2 \cdot \sigma_G^2 / B_0^2 + (1 - \alpha)^2 \cdot B^2 \cdot \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_G^2]^{0.5}}, \quad (3)$$

$$A = \gamma^{1/3} \cdot E / \varphi, \quad (4)$$

$$E = 1 - (1 + (1 - \varphi) \cdot (1 - \varphi / \gamma^{1/3})^{\varphi \cdot K_i / (1 - \varphi)}),$$

$$\varphi = V_3^S / V_3^L,$$

$$B = B = \frac{\gamma^{1/3} / \varphi - 1}{\beta_i \cdot (K_i \cdot f_i - \gamma^{1-K_i})}, \quad (5)$$

$$p(z_0) = p(z_0) = \int_{-z_0}^{\infty} p(z) dz, \quad (6)$$

где A и B — настроечные коэффициенты вероятностной модели; ΔT_{L-S} — температурный интервал затвердевания, °C; ε — скорость охлаждения, °C/мин; α — доля межосных участков; G — температурный градиент, °C/см; γ — доля жидкой фазы в двухфазной области, дол. ед.; σ_ε и σ_G — дисперсии величин ε и G ; K_i — условный эффективный коэффициент распределения элемента i , дол. ед.; f_i — коэффициент активности элемента i ; β_i — коэффициент массопереноса элемента i ; V_3^S и V_3^L — объем жидкой и твердой фаз в пределах рассматриваемой ячейки, м³; $p(z)$ — вероятность образования шнура.

Расчет усадки базируется на использовании коэффициента объемной усадки, характеризующего относительное изменение объема металла при охлаждении/нагреве на 1 °C. Усадка стали при охлаждении жидкого металла, при переходе из жидкого состояния в твердое и при охлаждении твердой фазы характеризуется коэффициентами объемной усадки α_L , α_{L-S} , и α_S .

Конкретное значение коэффициентов α_L и α_{L-S} зависит от состава стали. Изменение объема металла в элементарной ячейке, за время $\Delta\tau$ температура которой выше температуры ликвидус определяют по следующей формуле

$$\Delta V_\Sigma = \Delta V_L = V^{\tau-\Delta\tau} - V^{\tau-\Delta\tau} \cdot \alpha \cdot (T^{\tau-\Delta\tau} + T^\tau), \quad (7)$$

где ΔV_Σ — суммарная усадка металла ячейки вследствие ее охлаждения за время $\Delta\tau$, м³; ΔV_L — усадка жидкой фазы ячейки вследствие ее охлаждения за время $\Delta\tau$, м³; $V^{\tau-\Delta\tau}$ — объем жидкой фазы в ячейке в предыдущий момент времени, м³; α — коэффициент объемной усадки металла, дол. ед./град.; $T^{\tau-\Delta\tau}$ и T^τ — температура ячейки в предыдущий и текущий моменты времени, °C

Перед началом расчета изучаемую тепловую систему делят с учетом симметрии задачи на элементарные объемы-блоки. Для цилиндрического слитка теплообмен в направлении угловой координаты отсутствует. Узловые точки, в которых рассчитывают температуры, расположены по углам элементов разбивки. Распределенные тепловые связи, существующие в реальном теле, заменяются дискретными проводимостями между узловыми точками.

Граничные условия, задаваемые в программе «Крупный слиток» на линиях раздела различных областей системы, следующие:

- на оси симметрии системы $dT/dR = 0$;
- теплоотдача от слитка к изложнице определяется коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{с-и}$, который учитывает идеальный тепловой контакт в первый момент времени после заливки. В момент образования зазора, вследствие теплового расширения стенки изложницы и усадки слитка, теплообмен между слитком и изложницей происходит путем излучения и теплопроводности: $\alpha_{с-и} = \alpha_{излуч} + \alpha_{теплопр}$;
- теплообмен между изложницей, торцевой поверхностью прибыли слитка и окружающей средой учитывают конвективным теплообменом и теплообменом лучеиспускания;
- теплообмен на поверхностях раздела между изложницей и поддоном, изложницей и прибыльной надставкой учитывают введением дополнительных тепловых сопротивлений контакта. Учет влияния циркуляции металла происходит путем введения эффективных коэффициентов теплопроводности.

Влияние геометрии слитка на объем осевой рыхлости

В данной работе программа «Крупный слиток» была использована для изучения влияния геометрии слитка на его физическую неоднородность (объем осевой рыхлости). Осевая рыхлость — образующаяся при затвердевании в центральной части стального слитка пористость, вызванная недостаточностью питания жидким металлом этих объемов.

Исходные данные, используемые при компьютерном моделировании затвердевания слитков различной геометрии, были следующие: масса исследуемого слитка — 65 т; материал разливочной оснастки — сталь марки 15Л; прибыльная надставка утеплена асбестовым картоном (толщина слоя 0.010 м), одним слоем шамотного кирпича марки Ш1 (толщина слоя 0.065 м) и теплоизолирующей вставкой ProFax (толщина слоя 0.065 м); зеркало металла засыпают теп-

лоизолирующей смесью Nermat (толщина слоя 0.010 м) через 10 мин после окончания заливки металла в изложницу; марка заливаемой стали — 10ГН2МФА (таблица 1, при моделировании использовали среднее содержание каждого элемента); продолжительность разливки металла 25 мин; температура металла перед разливкой 1610 °С; температура оснастки: изложницы — 100°С, прибыльной надставки — 150 °С, поддона — 200 °С. Доля прибыльной части слитка была постоянной и составляла 20 % от общей массы слитка, при этом она имела цилиндрическую форму и ее нижний диаметр отличался от верхнего диаметра тела слитка на 100 мм. Кюмпель слитка во всех вариантах имел одинаковую форму усеченного конуса следующих размеров: высота 0.3 м, нижний диаметр 0.45 м, верхний диаметр 0.6 м. При моделировании затвердевания было учтено формирование твердой корочки слитка в процессе заливки. Объем осевой рыхлости рассчитывали, принимая во внимание поры, объем которых превышает 1 см³.

Таблица 1. Химический состав стали марки 10ГН2МФА, а также расчетные температуры ликвидус и солидус этой стали

	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Mo	V	Cu	Al	T_L	T_S
Min	0.08	0.17	0.08	0.0*	1.9	0.00*	0.00*	0.40	0.03	0.00*	0.005	1256	1511
Max	0.12	0.37	1.10	0.3	2.3	0.020	0.020	0.70	0.07	0.30	0.035	1511	1486
Сред	0.10	0.27	0.59	0.0	2.1	0.005	0.007	0.55	0.50	0.01	0.02	1518	1499

* — не регламентируется

Принимали, что плотность жидко-твердого расплава составляет 7.1 т/м³, плотность твердого — 7.8 т/м³. Коэффициент объемной усадки жидкой стали составляет 0.010 %/К; твердой стали — 0.006 %/К.

В качестве варьируемых параметров рассматривали конусность тела слитка на обе стороны (K) и отношение высоты тела слитка к его среднему диаметру (H/D). Зависимость объема осевой рыхлости искали в виде уравнения регрессии второго порядка, имеющее вид (8).

$$Y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_1 \cdot X_2 + B_4 \cdot X_1^2 + B_5 \cdot X_2^2, \quad (8)$$

где X_1 и X_2 — независимые переменные, соответствующие в данном случае конусности слитка и отношению H/D; B_0, B_1, B_2, B_3, B_4 и B_5 — коэффициенты регрессии, которые определяли на основе данных численного эксперимента.

При проведении серии расчетов придерживались центрального ортогонального композиционного плана второго порядка (таблицы 2 и 3).

Таблица 2. План численного эксперимента

Номер расчета	X_0	X_1	X_2	$X_1 \cdot X_2$	$X_{12}^{-0.667}$	$X_{22}^{-0.667}$
1	1	1	1	1	+0.33	+0.33
2	1	-1	1	-1	+0.33	+0.33
3	1	1	-1	-1	+0.33	+0.33
4	1	-1	-1	1	+0.33	+0.33
5	1	1	0	0	+0.33	-0.667
6	1	-1	0	0	+0.33	-0.667
7	1	0	1	0	-0.667	+0.33
8	1	0	-1	0	-0.667	+0.33
9	1	0	0	0	-0.667	-0.667

Результаты моделирования представлены на рисунке 1 и в таблице 3.

На основе данных эксперимента были определены искомые коэффициенты регрессии и получена следующая зависимость:

$$V_{\text{yn}} = -94.4999 + 102.194 \cdot H/D + 6.77083 \cdot K - 9.375 \cdot H/D \cdot K + 28.4445 \cdot (H/D)^2 + 0.03125 \cdot K^2. \quad (9)$$

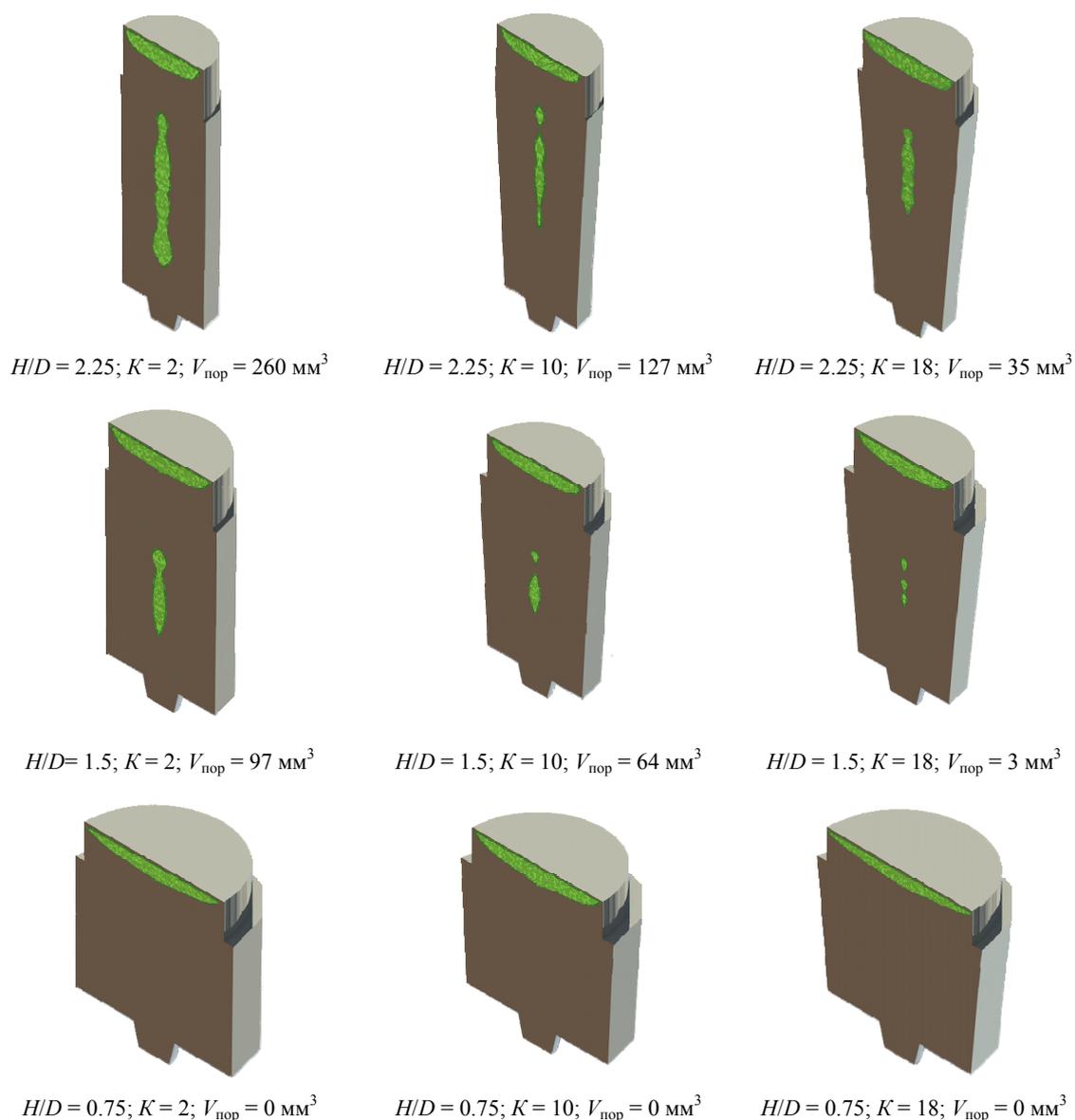


Рис. 1. Качественная картина влияния конусности слитка массой 63 т и отношения его высоты к среднему диаметру на объем осевой рыхлости (светлые участки в осевой части слитков)

Таблица 3. Факторы и уровни их варьирования в численном эксперименте для слитка массой 65 т

Факторы	Условное обозначение в мат модели	Уровни факторов	
		в натуральном масштабе	в кодированном виде
Конусность	X_1	2	-1
		10	0
		18	1
Отношение высоты тела к среднему диаметру слитка	X_2	0.75	-1
		1.50	0
		2.25	1

Поверхность, описываемая уравнением (9), представлена на рисунке 2.

Анализ полученного уравнения показывает, что уменьшение объема осевой пористости может быть достигнуто при повышении конусности слитка и уменьшении значения H/D . Наименьшая вероятность образования пор в слитке имеет место при низких значениях H/D и высокой конусности.

При значении $H/D = 1$ объем осевой рыхлости близок к нулю при любой конусности. При конусности около 20 % объем осевой рыхлости также близок к нулю при любом значении H/D .

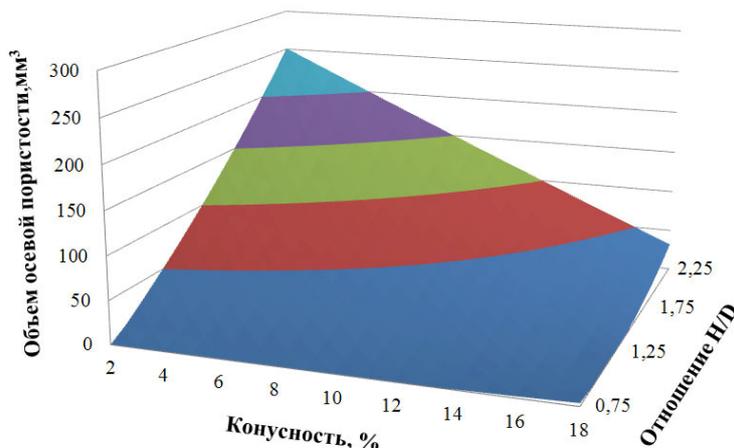


Рис. 2. Количественное влияние конусности слитка массой 63 т и отношения его высоты к среднему диаметру на объем осевой рыхлости

Следует отметить, что увеличение конусности слитка, уменьшающее объем осевой рыхлости, негативно отражается на сложности технологииковки, что связано с необходимостью придания поковке цилиндрической формы. Поэтому следует стремиться обеспечить нулевую пористость слитка при минимальном значении конусности.

Аналогичный оптимум может быть выявлен и в отношении величины H/D . Уменьшение этой величины приводит к уменьшению объема осевой рыхлости, однако при малых значениях H/D значительно увеличивается сечение затвердеваемого объекта, прямым следствием чего является увеличение его химической неоднородности [Дуб и др., 2014].

Выводы о направлении и силе влияния рассмотренных факторов на характеристики усадки справедливы только для выбранных интервалов их изменений.

Выводы

На примере слитка массой 65 т из стали 10ГН2МФА проведен анализ влияния конусности слитка и отношения H/D на объем осевой рыхлости. Показано, что осевая пористость в слитке монотонно уменьшается при уменьшении H/D и при увеличении конусности. При значении $H/D = 1$ объем осевой рыхлости близок к нулю при любой конусности. При конусности около 20 % объем осевой рыхлости также близок к нулю при любом значении H/D .

Получено квадратичное уравнение, связывающее объем осевой рыхлости с параметрами H/D и K .

Выводы об оптимальности геометрических параметров слитков справедливы только в исследованных пределах только для критерия объема осевой рыхлости.

Список литературы

- Дуб В. С. Исследование внецентренной ликвации и разработка методов подавления ее развития в крупных слитках: дисс. д. т. н. М.: ЦНИИТМАШ. — 1980. — Т. 1. — С. 395.
- Дуб В. С., Ромашкин А. Н., Мальгинов А. Н., Иванов И. А., Толстых Д. С. Влияние геометрии слитка на его химическую неоднородность. Часть 2 // *Металлург*. — № 2. — 2014. — С. 68–71.
- Копелиович Д. Д. Прогнозирование параметров зоны внецентренной ликвации в стальных слитках: дисс. к. т. н. М.: ЦНИИТМАШ. — 1990. — С. 222.