

УДК 669-412:620.192.43

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ СЛИТКА НА ЕГО ХИМИЧЕСКУЮ НЕОДНОРОДНОСТЬ. Часть II*

© **Дуб Владимир Семенович**, д-р техн. наук, **Ромашкин Александр Николаевич**, канд. техн. наук;
Иванов Иван Алексеевич, канд. физ.-мат. наук; **Толстых Дмитрий Сергеевич**;
Мальгинов Антон Николаевич

ОАО НПО «ЦНИИТМАШ». Россия, Москва. E-mail: an_romashkin@cniitmash.ru

Статья поступила 18.02.2013 г.

На основе компьютерного моделирования и обобщения имеющегося опыта изучения химической неоднородности кузнечных слитков выявлены некоторые общие тенденции распределения ликватов в осевом и радиальном направлениях слитков. Разработаны рекомендации по оптимизации геометрии кузнечных слитков, позволяющие минимизировать их химическую неоднородность.

Ключевые слова: слиток; технология; разливка; неоднородность; ликвация; сегрегация; скорость затвердевания.

Статья посвящена изучению влияния геометрии слитка на его химическую неоднородность с помощью компьютерного моделирования. В первой части работы было приведено качественное описание изменения содержания примесей по сечению слитков. С целью количественной оценки химической неоднородности слитков в работе было проведено компьютерное моделирование затвердевания слитков различной геометрии. Для моделирования использовали программу «Крупный слиток». Преимуществами этой программы по сравнению с существующими аналогами являются возможность учета особенностей затвердевания больших объемов металла, в первую очередь распределения примесей, оказывающих существенное влияние на химическую, физическую и структурную неоднородность слитка, а также возможность количественной оценки объема пор в слитке. Адекватность получаемых в программе результатов подтверждена сопоставлением с результатами экспериментальных исследований [1].

Часть 2. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ХИМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СЛИТКОВ

В качестве исходных, используемых при компьютерном моделировании затвердевания слитков различной геометрии, приняты следующие данные: масса слитка 65 т; материал разливочной оснастки – сталь 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 теплоизолирующей смесью Nermat (толщина слоя 0,010 м) через 10 мин после окончания заливки металла в изложницу; марка разливаемой стали – 10ГН2МФА (табл. 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 – 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 0,6 м. При моделировании затвердевания было учтено формирование твердой корочки слитка в процессе заливки. Объем осевой рыхлости рассчитыва-

Таблица 1. Химический состав стали 10ГН2МФА по ТУ 0893-014-00212179-2004 и в опытном металле; расчетные температуры ликвидус и солидус этой стали

Металл	Содержание элементов, мас. %											T_L	T_S
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Mo	V	Cu	Al		
По ТУ, мин. значение	0,08	0,17	0,08	0,0	1,9	0	0	0,40	0,03	0,00	0,005	1256	1511
По ТУ, макс. значение	0,12	0,37	1,10	0,3	2,3	0,020	0,020	0,70	0,07	0,30	0,035	1511	1486
Опытный состав	0,10	0,27	0,59	0,0	2,1	0,005	0,007	0,55	0,50	0,01	0,02	1518	1499

*Часть 1 – см. Металлург. 2013. № 11. С. 45–52.

Таблица 2. Теплоемкость и теплопроводность использованных при моделировании материалов

Свойство материала	Температура, °С									
	100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1400
<i>Сталь 35А (материал разливочной оснастки)</i>										
λ , Вт/(м·К)	0,69	0,71	0,66	0,58	0,59	0,6	0,65	0,66	0,79	1,06
C_p , Дж/(кг·К)	770	820	860	910	1010	1080	1090	1080	1160	1210
<i>Асбест</i>										
λ , Вт/(м·К)	0,144	0,168	0,192	0,216	0,240	0,264	0,288	0,312	0,360	0,456
C_p , Дж/(кг·К)	1032	1128	1197	1253	1303	1374	1402	1461	1520	1679
<i>Шамот марки Ш1</i>										
λ , Вт/(м·К)	1,01	1,05	1,08	1,12	1,16	1,19	1,25	1,26	1,34	1,48
C_p , Дж/(кг·К)	203	212	220	228	235	241	247	251	256	261
<i>ProFax</i>										
λ , Вт/(м·К)	0,11	0,12	0,14	0,16	0,19	0,22	0,24	0,26	0,48	0,60
C_p , Дж/(кг·К)	872	901	982	1063	1120	1152	1168	1175	1205	1289
<i>Теплоизоляция прибыльной части (эквивалентное значение)</i>										
λ , Вт/(м·К)	0,292	0,347	0,402	0,457	0,512	0,567	0,622	0,677	0,787	1,007
C_p , Дж/(кг·К)	1,23	1,287	1,34	1,389	1,434	1,475	1,512	1,545	1,599	1,659
<i>Теплоизолирующая засыпка зеркала прибыли</i>										
λ , Вт/(м·К)	0,085	0,114	0,143	0,172	0,201	0,230	0,259	0,288	0,346	0,360
C_p , Дж/(кг·К)	262	614	697	741	773	800	826	850	896	987
<i>Сталь 10ГН2МФА (разливаемая сталь)</i>										
λ , Вт/(м·К)	38,4	37,9	36,8	36,8	24,5	32,4	28	27,2	27,7	27,7
C_p , Дж/(кг·К)	502	511	523	536	544	553	561	569	582	590

ли, принимая во внимание поры, объем которых превышает 1 см³.

Было принято, что плотность жидко-твердого расплава составляет 7,1 т/м³, плотность твердого – 7,8 т/м³. Коэффициент объемной усадки жидкой стали 0,010 %/К; твердой – 0,006 %/К. Теплофизические свойства материалов разливочной оснастки приведены в табл. 2.

Провели анализ результатов расчета распределения углерода в радиальном и осевом направлениях слитков массой 65 т из стали 10ГН2МФА с различным соотношением высоты и диаметра (h/d) и различной конусностью K . Графики, иллюстрирующие результаты расчета, представлены на рис. 1.

Изучили также влияние увеличения содержания углерода на его распределение в слитках различной конфигурации (рис. 2).

Из представленных на рис. 1 и рис. 2 данных видно, что диапазон изменения концентрации углерода по высоте слитка возрастает с уменьшением значения соотношения h/d . При значении $h/d = 1$ конусность практически не влияет на распределение углерода ввиду того, что при кристаллизации такого слитка условия для направленного затвердевания обеспечиваются при любой

конусности. Наиболее обогащенная ликватами часть металлического расплава всегда гарантированно выводится в прибыльную часть слитка.

С уменьшением конусности слитка при прочих равных условиях на кривых распределения углерода увеличивается число локальных экстремумов. Это связано с ухудшением условий питания осевой части слитка расплавом при понижении его конусности и формировании условий для описанного выше «захвата» жидкости. Следует отметить, что подобные пики концентраций отмечаются даже при конусности 18% в слитке с высоким соотношением h/d .

С увеличением значения h/d увеличивается разница между концентрациями углерода на фиксированных уровнях высоты слитка при изменении конусности (см. рис. 2), что говорит о возрастании влияния параметра K с ростом соотношения h/d . Причем эта особенность характерна для верхней части слитка. В нижней его части, где условия затвердевания для всех слитков с одинаковым соотношением h/d , независимо от конусности, примерно аналогичны, подобное различие значений концентрации углерода выражено в гораздо меньшей степени. Это говорит о том, что на особенности затвердевания нижней трети слитка

оказывает влияние только соотношение h/d , конусность здесь значимой роли не играет.

При увеличении содержания углерода значительно возрастает его ликвация: так, если в слитке из стали с 0,1% С максимальное содержание этого элемента превышало среднеплавочное на 20–30%, то в слитке той же массы из стали с содержанием углерода 0,3% его содержание может достигать максимально 0,55%, что больше среднеплавочного почти на 80%.

Результаты моделирования затвердевания ультракороткого слитка с соотношением $h/d = 0,5$ показали, что особенности его химической неоднородности соответствуют всем названным ранее тенденциям: диапазон колебания содержания углерода увеличился, условия направленного затвердевания были обеспечены, и кривая распределения углерода имеет лишь один локальный экстремум в нижней части (рис. 3). Следует отметить, что в таком слитке при исходном содержании углерода около 0,10% его минимальное и максимальное содержание в верхней прибыльной части может достигать 0,09 и 0,13% соответственно, т.е. диапазон колебания концентрации может составлять почти 50% от минимального содержания. В ряде случаев подобный разброс может быть недопустимым, например, при изготовлении металлопродукции с требуемой высокой однородностью свойств. В таких случаях слитки подобной геометрии применять нельзя.

Значительное развитие химической неоднородности в слитках подобной конфигурации (рис. 4) экспериментально подтверждено в работах [2, 3].

Таким образом, анализ распределения углерода в продольном направлении показывает, что минимальной химической неоднородностью характеризуется слиток с максимальным значением h/d независимо от его конусности K . Значение K определяет только особенности изменения концентрации углерода в пределах, зависящих от h/d .

Данные по оценке распределения углерода по радиусу слитков различной геометрии (рис. 5) соответствуют приведенному ранее качественному описанию характера кривых распределения концентрации примеси в радиальном направлении. Причем в данном случае изменение концентрации в среднем сечении носит слабо понижающийся характер. Это говорит о том, что при затвердевании нижележащей части слитка количество примеси, вытесненной в расплав (из которого была сформирована эта часть слитка), было относительно малым и недостаточным для обеспечения

повышения концентрации примеси в радиальном направлении в средней части слитка.

Из полученных кривых распределения также видно, что на них отсутствуют ярко выраженные экстремумы, характерные, как было сказано выше, для зоны шнуров внецентренной ликвации (ЗШВА). Однако это не говорит о том, что ЗШВА там не будет, так как заложенный в программу «Крупный слиток» алгоритм расчета процесса затвердевания учитывает протекающие на микроуровне процессы опосредованно и в связи с этим не позволяет оценить возможность «захвата» жидкости в межосных пространствах (для расчета месторасположения в слитке ЗШВА следует использовать отдельный модуль расчета А- и V-образной ликвации программы «Крупный слиток» [4, 5]). Этим обусловлено отсутствие пиков концентрации на кривых радиального распределения углерода для слитков различной геометрии, хотя анализ теплофизических параметров их затвердевания показывает, что в некоторых случаях обеспечиваются благоприятные условия для образования шнуров внецентренной ликвации. Однако анализ расположения ЗШВА выходит за рамки тематики данной работы, поэтому подробно этот вопрос здесь не рассмотрен.

Помимо этого анализ радиального распределения концентрации углерода показывает, что минимальной химической неоднородностью также обладает слиток с максимальным отношением h/d . Увеличение конусности слитка приводит к уменьшению разницы концентраций в приповерхностном и осевом слоях в донной части слитка и, наоборот, увеличивает эту разницу в верхней части слитка. Такое изменение особенностей распределения примесей связано с изменениями поперечного размера затвердевающего объекта: в нижней части при повышении конусности сечение уменьшается, ликвационные процессы получают меньшее развитие, и соответственно разница значений концентрации примеси в осевой и приповерхностной зонах уменьшается. В подприбыльной зоне слитка увеличение конусности вызывает увеличение площади затвердевающего сечения, соответственно распределение примеси происходит на более протяженном участке, и разница между концентрациями в осевом и приповерхностном слоях увеличивается. Таким образом, для уменьшения химической неоднородности слиток должен иметь максимальное значение h/d и нулевую конусность.

Дополнительно в работе был рассмотрен двухфакторный план второго порядка, в котором

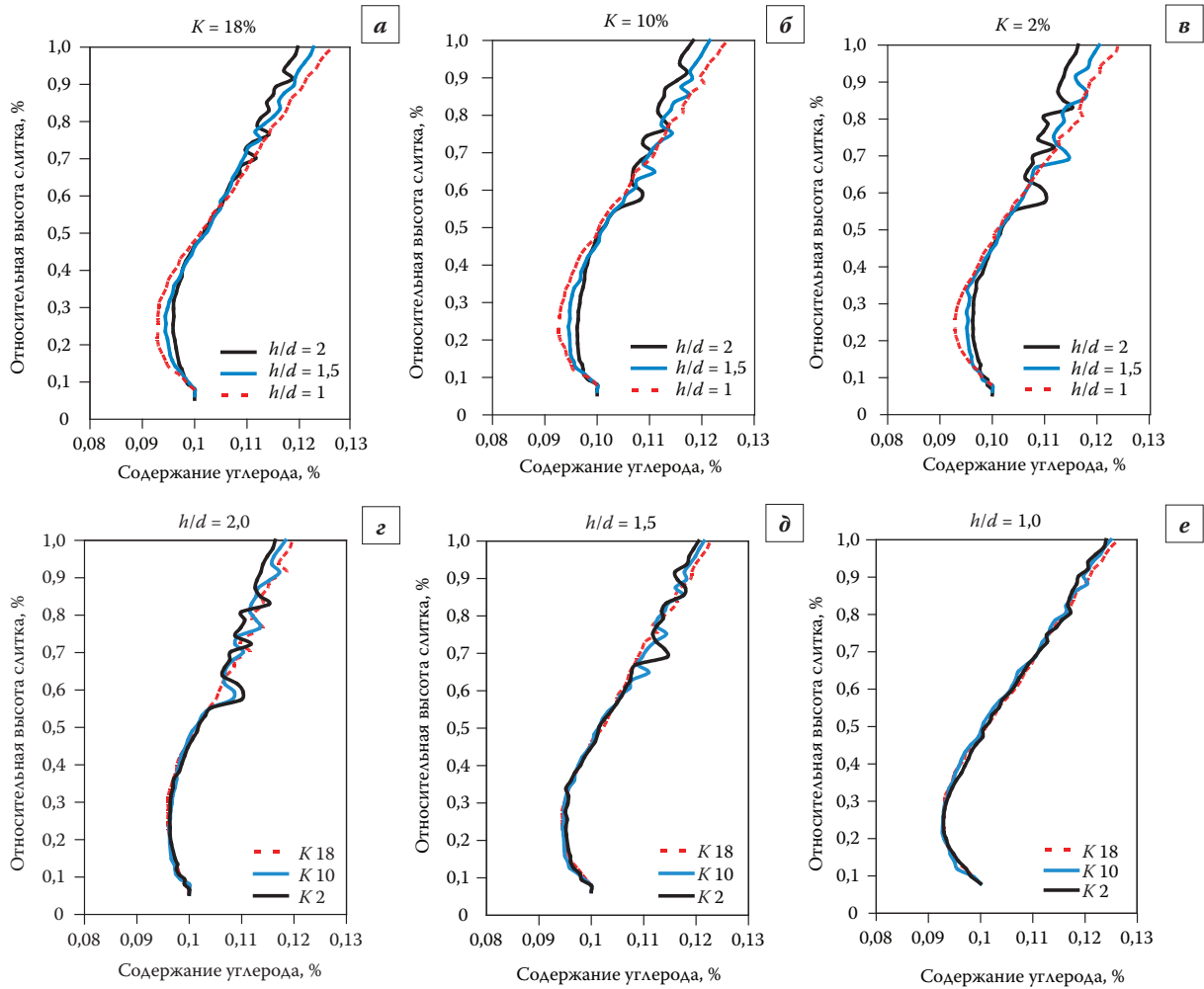


Рис. 1. Влияние конусности слитка (а-в) и соотношения h/d (г-е) на особенности осевого распределения углерода (сталь 10ГН2МФА, слиток массой 65 т)

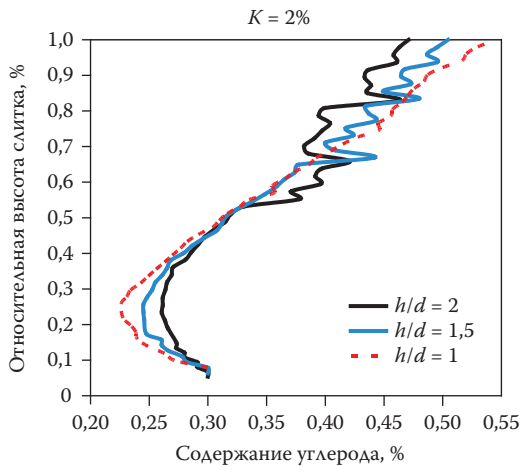


Рис. 2. Влияние соотношения h/d слитка на особенности осевого распределения углерода при содержании в разливаемом металле 0,3% С (сталь 10ГН2МФА, слиток массой 65 т)

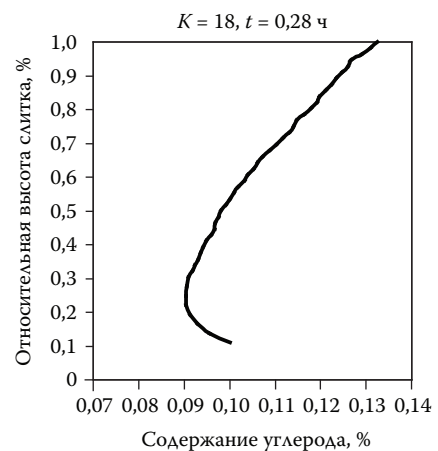


Рис. 3. Распределение углерода по высоте осевой части слитка массой 63 т с соотношением $h/d = 0,5$

в качестве варьируемых параметров рассматривали конусность слитка K и отношение высоты тела слитка к его среднему диаметру (h/d), а в качестве функции отклика – концентрацию углерода $[C]$ в

осевой части слитка (%). В результате было получено интерполяционное уравнение 2-й степени $[C] = 0,0892 + 40,70 \cdot 10^{-4} \cdot h + 51,94 \cdot 10^{-4} \cdot h/d - 98,20 \cdot 10^{-4} \cdot h(h/d) + 39,20 \cdot 10^{-3} \cdot h^2 + 93,59 \cdot 10^{-6} \cdot (h/d)^2$. (1)

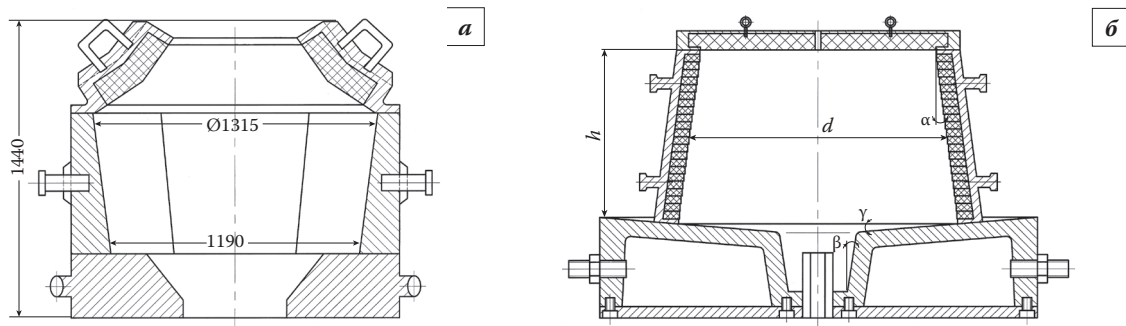


Рис. 4. Изложницы для слитков со сверхнизким соотношением h/d : а – для укороченного уширенного кверху слитка массой 8 т с отношением $h/d = 0,5$ и $K = 18\%$ [4]; б – для укороченного уширенного к низу слитка массой 18 т с отношением $h/d = 0,7$ и $K = 12\%$ [5]

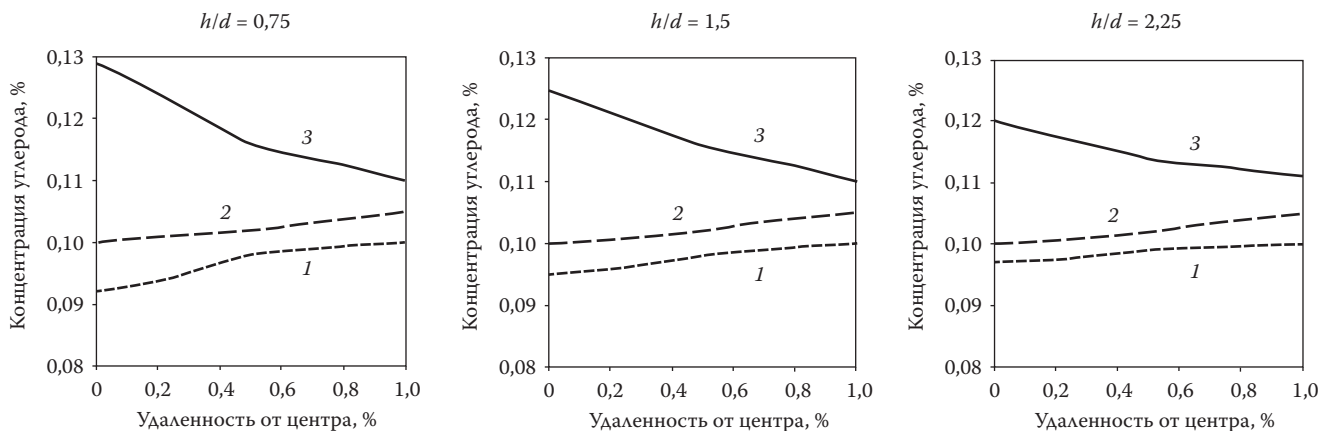


Рис. 5. Распределение углерода по радиусу слитков массой 65 т различной геометрии из стали 10ГН2МФА в донном (1), среднем (2) и подприбыльном (3) сечениях

Для сравнения этого уравнения и данных, полученных из программы «Крупный слиток», был рассчитан коэффициент корреляции ($k_{кор}$) и получено уравнение его зависимости от рассматриваемых параметров (абс. %):

$$k_{кор} = 0,9791 + 82,67 \cdot 10^{-4} \cdot h/d + 26,18 \cdot 10^{-4} \cdot K - 0,0076 \cdot (h/d)^2 - 44,41 \cdot 10^{-6} \cdot K^2. \quad (2)$$

Значение $k_{кор}$ характеризует разброс концентраций углерода относительно его среднего содержания для выбранной высоты слитка. Также было получено уравнение зависимости абсолютного диапазона изменения концентра-

ции углерода $\Delta[C]$ от исследованных параметров (абс. %):

$$\Delta[C] = 0,046 - 0,0173 \cdot h/d - 83,33K + 26,67 \cdot 10^{-4} \cdot (h/d)^2 + 10,42 \cdot 10^{-6} \cdot K^2. \quad (3)$$

Графики, иллюстрирующие выявленные зависимости, приведены на рис. 6.

В целом полученные результаты соответствуют приведенным выше положениям. Так, диапазон изменения содержания углерода по высоте осевой части слитка значительно увеличивается при уменьшении h/d и слабо увеличивается при увеличении конусности. Разброс (дисперсия)

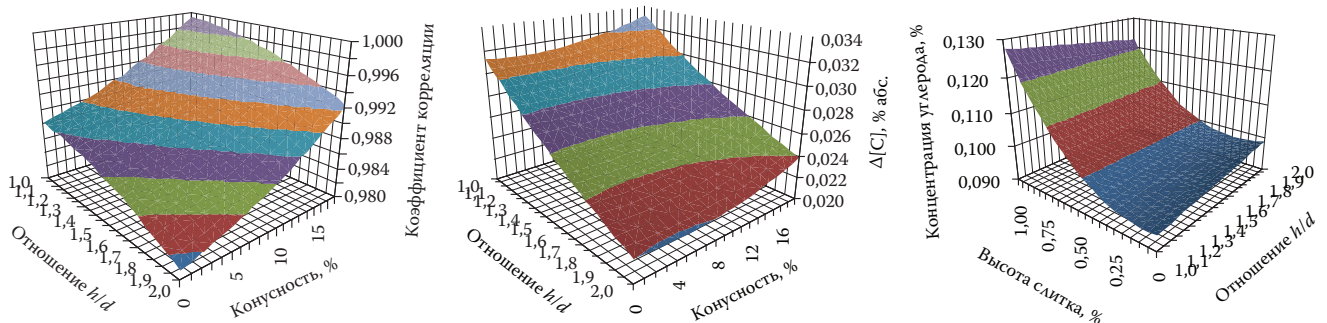


Рис. 6. Влияние геометрии слитка на его химическую неоднородность

концентрации углерода увеличивается с уменьшением конусности и увеличением соотношения h/d , т.е. при таких изменениях геометрии слитка на кривой распределения углерода увеличивается число локальных экстремумов, связанных, как было сказано выше, с «захватом» жидкого металла в теле слитка.

Полученные уравнения регрессии позволяют критически оценить геометрию слитка с целью обеспечения его заданной химической однородности.

Выводы. На основе экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования показано, что в случае отсутствия условий для формирования зоны шнуров внецентренной ликвации (ЗШВЛ) содержание ликватов по радиусу слитка от периферии к центру уменьшается в донной части; по-разному ведет себя в среднем сечении и существенно возрастает в подприбыльном сечении слитка; при этом содержание примеси в приповерхностных слоях слитка, как правило, слабо (на 10–15 отн. %) возрастает снизу вверх по высоте слитка.

В слитках, в которых выполняются условия для направленного затвердевания, изменение концентрации примеси по высоте осевой части слитка носит уменьшающийся характер до высоты примерно $0,25h$ от плоскости сочленения с кюмпелем, затем монотонно возрастает (см. рис. 2). При этом минимальное и максимальное содержание примеси может отличаться в несколько раз.

В случае если условия направленного затвердевания не обеспечиваются или при затвердевании слитка возникают условия для формирования

ЗШВЛ, на кривых распределения появляются пики, причем разница между начальным и конечным содержанием примеси в металле уменьшается.

С помощью компьютерного моделирования проведен анализ влияния геометрии слитка на его химическую неоднородность. Получены уравнения, позволяющие оценить степень химической неоднородности слитка в зависимости от его конусности и отношения высоты слитка к его диаметру h/d . Показано, что наиболее однороден по химическому составу слиток с максимальным значением h/d и нулевой конусностью.

Библиографический список

1. Дуб В.С., Ромашкин А.Н., Макарычева Е.В. и др. Метод разработки технологии производства кузнечных слитков // Тяжелое машиностроение. № 7. 2012. С. 13–20.
2. Дуб В.С., Копелиович Д.Д., Ромашкин А.Н. и др. Влияние технологических параметров на размер зоны внецентренной ликвации. Ч. I. Влияние состава разливаемой стали на размер зоны внецентренной ликвации // Электрометаллургия. 2013. № 2. С. 24–32.
3. Дуб В.С., Копелиович Д.Д., Ромашкин А.Н. и др. Влияние технологических параметров на размер зоны внецентренной ликвации. Ч. II. Влияние состава разливаемой стали на размер зоны внецентренной ликвации // Электрометаллургия. 2013. № 4. С. 38–43.
4. Мадянов А.М. Управление процессом затвердевания стали в изложнице при изготовлении тяжелых кузнечных слитков: Сб. тр. 2-го совещания по теории литейных процессов «Затвердевание металлов». М. : Машгиз, 1958. С. 397–412.
5. Марков О.Е. Исследование укороченных кузнечных слитков с направленной кристаллизацией // Металл и литье Украины. 2012. № 8 (231). С. 12–16.

INFLUENCE OF INGOT GEOMETRY ON ITS CHEMICAL HETEROGENEITY. Part II

© Dub V.S., Dr Sci. (Eng.), prof.; Romashkin A.N., Cand. Sci. (Eng.); Ivanov I.A., Cand. Sci. (Phys.-Math.); Tolstykh D.S.; Malginov A.N.

Computer simulation and synthesis of the experience of studying chemical heterogeneity in forging ingots revealed some general trends of segregations distribution in the axial and radial directions of ingots. Technological recommendations are suggested for ingots geometry optimization to reduce their chemical heterogeneity.

Keywords: ingot; technology; casting; liquation; segregation; solidification rate.