УДК 669-412:620.192.43

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ СЛИТКА НА ЕГО ХИМИЧЕСКУЮ НЕОДНОРОДНОСТЬ. Часть I

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

Химическая неоднородность кузнечных слитков может быть причиной повышенной дисперсии свойств готовой металлопродукции. Проявление ее в грубых формах (например, в виде шнуров внецентренной ликвации) приводит к затруднениям при изготовлении изделий ответственного назначения, а в ряде случаев и к отбраковке заготовок и готовой металлопродукции.

Образование химической неоднородности слитка определяется кинетическими особенностями его затвердевания, зависящими, в свою очередь, от размеров и конфигурации слитка.

Наименьшая степень развития химической неоднородности формируется в максимально быстро затвердевающих слитках, т.е. в слитках с наиболее развитой удельной (приходящейся на единицу массы) поверхностью охлаждения: слитки с высоким (длинные стержни) или сверхнизким (тонкие диски) отношением высоты к диаметру h/d (рис. 1) – слитки с более сложной поверхностью, относятся к категории отливок. Однако такие слитки не находят широкого применения ввиду того, что они пригодны для целевого использования лишь в ограниченном числе случаев.

Несмотря на то что изучение природы образования химической неоднородности являлось предметом многочисленных исследований, разработка геометрии слитков, обеспечивающей оптимальное сочетание широты их целевой номенклатуры и степени развития химической неоднородности, продолжает оставаться актуальной до настоящего времени.

В связи с этим в данной работе предложены рекомендации по совершенствованию геометрии кузнечных слитков с целью минимизации их химической неоднородности при сохранения универсальности применения.

В первой части статьи приведено качественное описание химической неоднородности слитков и сделана попытка трактовки полученных на практике результатов. Во второй части приведены результаты изучения влияния геометрии слитков на их химическую неоднородность по данным компьютерного моделирования. Сформулированы обобщающие технологические рекомендации по оптимизации геометрии слитков с целью уменьшения их химической неоднородности.

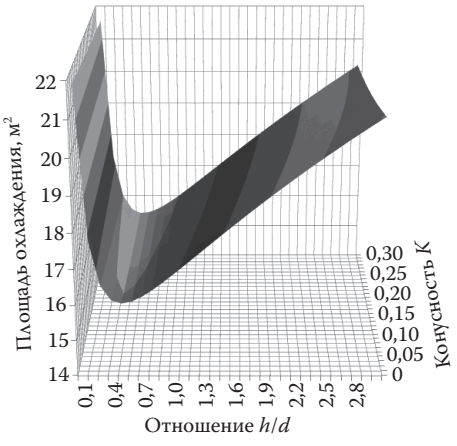

Рис. 1. **Зависимость площади поверхности охлаждения (сумма площадей боковой и нижней торцевой поверхностей) уширенного кверху гладкого (неограненного) слитка массой 70 т от отношения h/d и конусности**

Часть 1. КАЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СЛИТКА

Обобщение наработанных в течение более 50 лет в ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» результатов исследования химической неоднородности кузнечных слитков показывает, что в общем случае содержание ликватов по радиусу слитка от периферии к центру уменьшается в донной части; по-разному ведет себя в среднем сечении (в зависимости от геометрии слитка и состава разливаемой стали) и существенно возрастает в подприбыльном сечении; при этом содержание примеси в приповерхностных слоях слитка, как правило, слабо (на 10–15 отн. %) возрастает снизу вверх по высоте слитка (рис. 2).

В осевой части слитка по направлению от кюмпеля к прибыли в общем случае концентрация примесей сначала уменьшается до высоты примерно (0,2–0,3)h от плоскости сочленения с кюмпелем, затем монотонно возрастает (рис. 3). При этом разница между минимальным и максимальным содержанием примесей может составлять сотни относительных процентов.

Подобное изменение содержания примесей связано с особенностями их распределения между жидкой и твердой фазами при затвердевании и может быть объяснено следующим образом. В соответствии с законом распределения примеси в процессе затвердевания расплавов на основе железа при образовании твердой фазы концентрация примеси в ней меньше, чем в исходном расплаве. Разница концентраций примеси в жидком и твердом металле зависит от скорости охлаждения и может изменяться от нуля до максимального значения, соответствующего равновесной диаграмме состояния, при этом коэффициент распределения изменяется от единицы до равновесного (рис. 4). Чем меньше скорость затвердевания, тем больше система приближается к равновесию, а значит, тем больше концентрация примеси в жидком металле отличается от концентрации примеси в твердом (см. рис. 4).

При формировании приповерхностной части слитка (особенно находящейся в его нижней четверти, где поверхность охлаждения наиболее развита) скорость затвердевания достаточно высока, и жидкость обогащена ликватами незначительно, поэтому концентрация последних в этой части слитка мало отличается от их концентрации в исходном разливаемом металле. По мере удаления от поверхности происходит замедление темпа затвердевания, коэффициент распределения уменьшается, и, соответственно, в твердый металл поступает меньшее количество примесей. В результате уменьшается их концентрация в направлении от периферии слитка к его центру. Так продолжается до определенного момента, когда, несмотря на значительно уменьшенный коэффициент распределения, концентрация примеси в жидкой фазе достигнет такого значения, при котором в формирующемся на следующем этапе объеме твердой фазы концентрация примеси в ней будет больше, чем на предыдущем. После этого начинается увеличение концентрации примеси в твердой фазе, которое будет продолжаться до окончания затвердевания.

Для демонстрации справедливости данных положений было рассчитано распределение примеси при постоянном и переменном значениях коэффициента распределения. Следует обратить внимание, что этот расчет не может быть использован для понимания процессов в пределах микрообъемов и применен в данном случае для описания затвердевания макрообъемов, где коэффициент распределения может значимо меняться.

Была рассмотрена модель кристаллизации Шейла [7], в соответствии с которой в твердой фазе диффузия примеси полностью отсутствует, тогда как в жидкости происходит мгновенное усреднение состава. В соответствии с этой моделью значение концентрации примеси в твердой фазе может быть рассчитано по выражению

$$C_{S(i)} = k_i C_{(i)}/[1 + (k-1)\eta_S], \quad (1)$$

где $C_{S(i)}$ – концентрация i-той примеси в твердой фазе, %; k_i – равновесный коэффициент распределения i-той примеси; $C_{(i)}$ – исходная концентрация примеси в расплаве, %; η_S – доля твердой фазы.

Расчет значения $C_{S(i)}$ был проведен для случаев k_i = 0,25 (равновесный коэффициент распределения углерода в железе) и $k = f(\upsilon_{\text{затв}})$. В последнем случае значение k рассчитывали в зависимости от скорости затвердевания по формуле Прима, Бартона Слихтера, предложенной в работе [8]

$$k = k_0/[k_0 + (1 - k_0)\exp(-\upsilon_{\text{затв}}\delta/d)], \quad (2)$$

где d – коэффициент диффузии, м^2/с (составляет величину порядка (1–6)·10^{-5} м^2/с); k_0 – равновесный коэффициент распределения; $\upsilon_{\text{затв}}$ – скорость перемещения поверхности раздела, м/с; δ – толщина диффузионного слоя, м (изменяется в зависимости от интенсивности перемешивания от 10^{-5} (случай весьма интенсивного перемешивания) до 10^{-3} м (естественная конвекция).

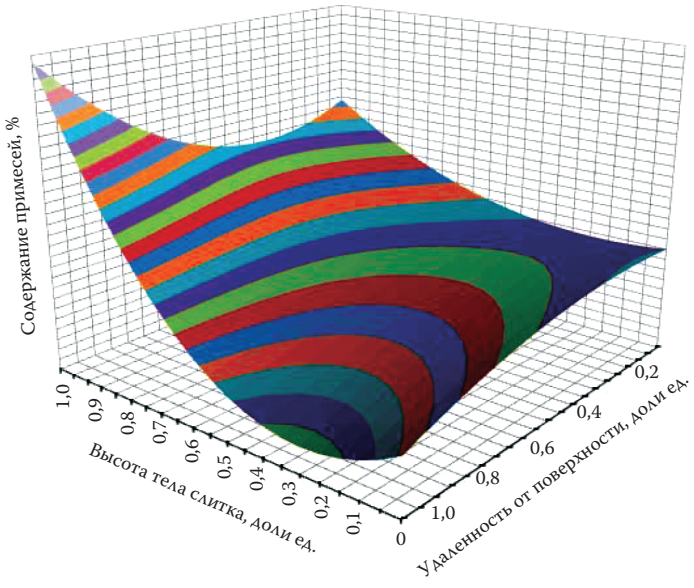

Рис. 2. **Общая картина распределения ликватов в слитке в осевом и радиальном направлениях (для слитков, геометрия которых обеспечивает наличие условий направленного затвердевания и исключает условия формирования шнуров внецентренной ликвации)**

Результаты определения продвижения нижней точки жидкометаллической ванны (по сути вертикальной скорости кристаллизации) при затвердевании стальных слитков в изложницах показывают, что на уровне 10–100% от высоты тела слитка скорость затвердевания изменяется примерно от 0,001 до 0,02–0,03 см/с по параболическому закону с максимумом на уровне 70–90% (рис. 5).

Однако на начальных этапах скорость затвердевания существенно выше: так, первые несколько сантиметров корочки формируются при скоростях 0,01–0,10 см/с, последующие примерно 0,5 м со скоростями 0,001–0,01 см/с, что отвечает известному закону квадратного корня, в соответствии с которым толщина затвердевшей корочки прямо пропорциональна времени затвердевания в степени 0,5

$$\delta = k_{\text{затв}}\tau^{0,5}, \qquad (3)$$

где δ – толщина затвердевшей корочки, мм; $k_{\text{затв}}$ – коэффициент затвердевания, мм/с^{0,5} (на практике коэффициент затвердевания ме-

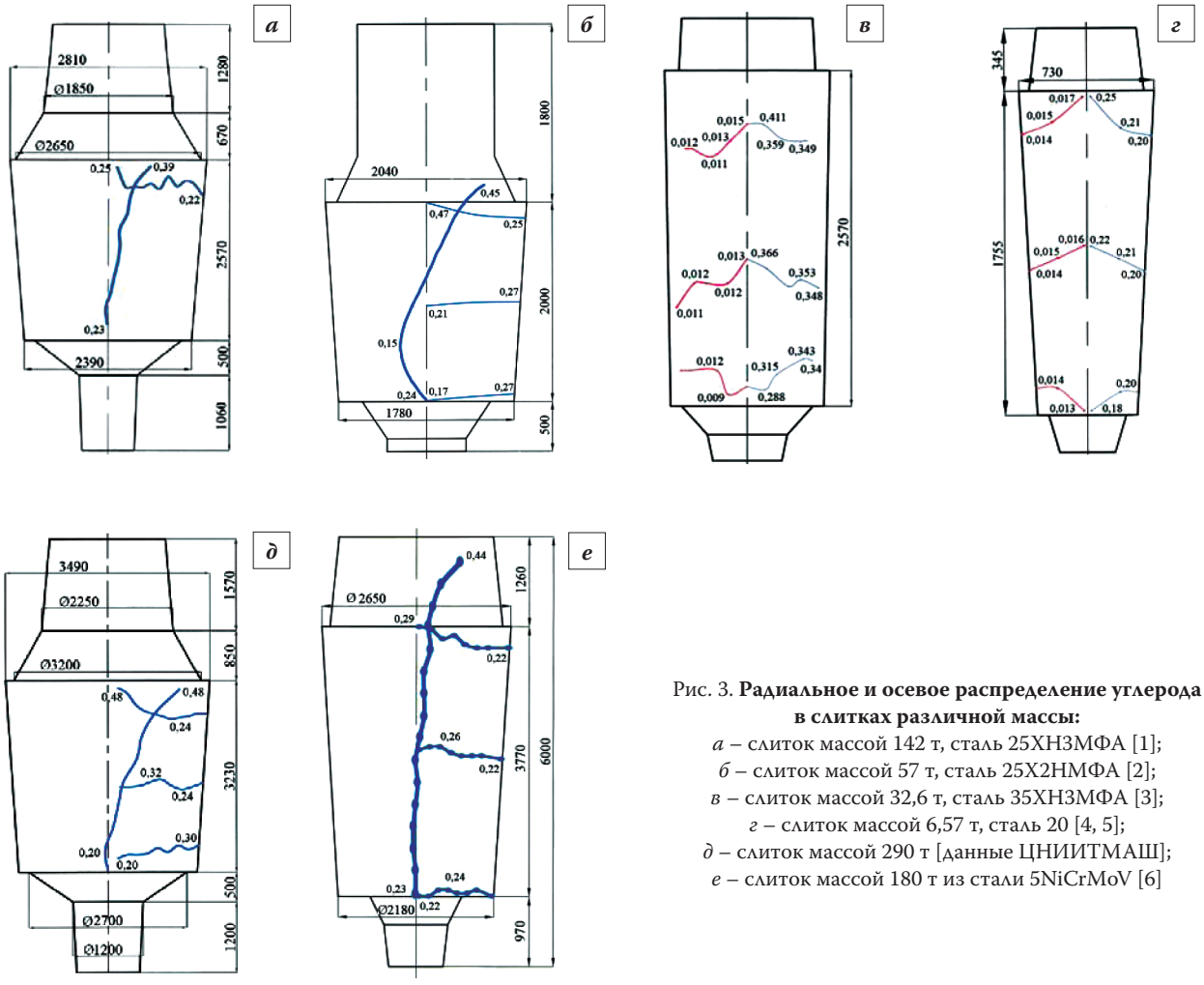

Рис. 3. **Радиальное и осевое распределение углерода в слитках различной массы:**
а – слиток массой 142 т, сталь 25ХН3МФА [1];
б – слиток массой 57 т, сталь 25Х2НМФА [2];
в – слиток массой 32,6 т, сталь 35ХН3МФА [3];
г – слиток массой 6,57 т, сталь 20 [4, 5];
д – слиток массой 290 т [данные ЦНИИТМАШ];
е – слиток массой 180 т из стали 5NiCrMoV [6]

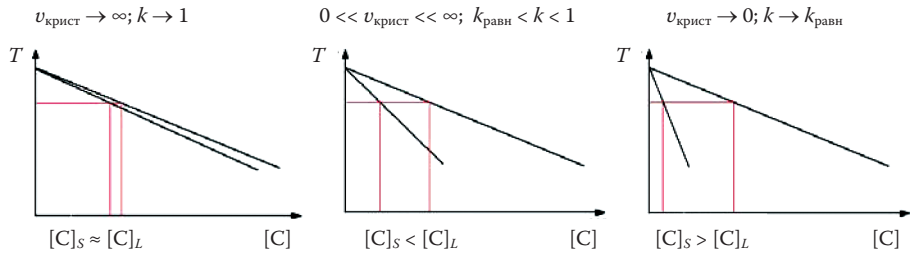

Рис. 4. **Изменение характера распределения примеси между жидкой и твердой фазами по мере затвердевания слитка**

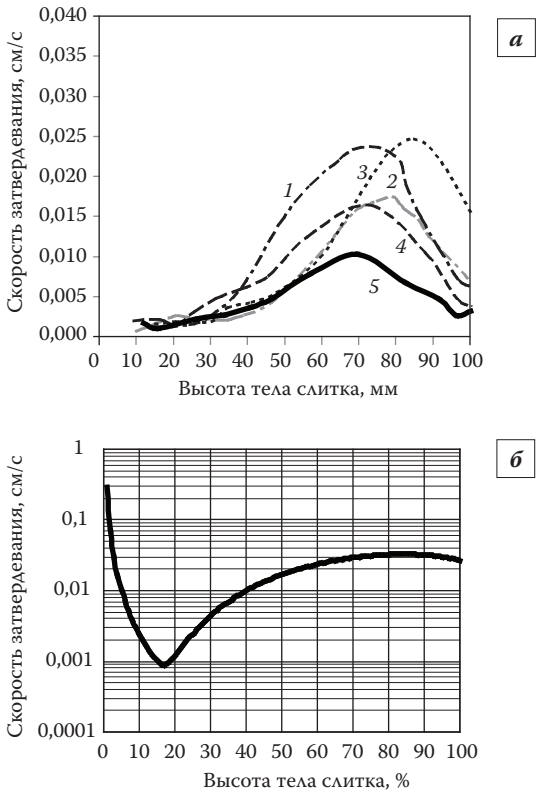

Рис. 5. **Изменение скорости продвижения нижней точки жидкометаллической ванны по высоте слитка:**
а – результаты компьютерного моделирования (*1* и *2* – для двух слитков массой 20 т из стали с 9% Cr–1% Mo [9]; *3* – для слитка массой 110 т с соотношением средних диаметров прибыли и тела, равным 0,71, из стали с 3,5% Ni–Cr–Mo–V [10]; *4* – для двух слитков массой 135 т из стали с 3,5% Ni–Cr–Mo–V [10]; *5* – для слитка массой 110 т с соотношением средних диаметров прибыли и тела, равным 0,91, из стали с 3,5% Ni–Cr–Mo–V [10]); *б* – общий ход кривой изменения скорости затвердевания по высоте слитка

талла в изложнице при ее обычном воздушном охлаждении изменяется также несущественно и составляет 2,8–3,2 мм/с^{0,5}); τ – время затвердевания, с.

Наличие столь высоких скоростей затвердевания в приповерхностной части слитка говорит о том, что кривая зависимости скорости кристаллизации от высоты слитка должна иметь синусоидальную форму с первым максимумом в точке h = 0 и вторым при h = 70–90% (рис. 6).

Таким образом, скорость затвердевания слитка в вертикальном направлении сначала резко уменьшается, затем несколько возрастает и к концу затвердевания слитка вновь несколько уменьшается. Резкое уменьшение скорости затвердевания на первых этапах затвердевания, видимо, связано с увеличением теплового сопротивления твердой корочки металла. Увеличение скорости затвердевания в вертикальном направлении связано, с одной стороны, с увеличением удельной поверхности теплоотвода от лунки жидкого металла, с другой – со смыканием горизонтально направленных фронтов затвердевания. И, наконец, замедление темпа затвердевания на последних этапах связано с тепловым воздействием прибыли слитка.

Результаты расчета значений коэффициента распределения k по выражению (2) (при $\delta = 10^{-3}$ см и $D_C = 3 \cdot 10^{-5}$ м^2/с – коэффициент диффузии углерода) с учетом синусоидальной зависимости скорости затвердевания от высоты (см. рис. 5, *б*) приведены на рис. 6. Там же приведены результаты расчета распределения примеси по уравнению (1) при k = const и при $k = f(v_{затв})$. Как видно, при постоянном значении коэффициента распределения концентрация примеси в твердом металле непрерывно увеличивается, тогда как при $k = f(v_{затв})$ она сначала уменьшается и только затем увеличива-

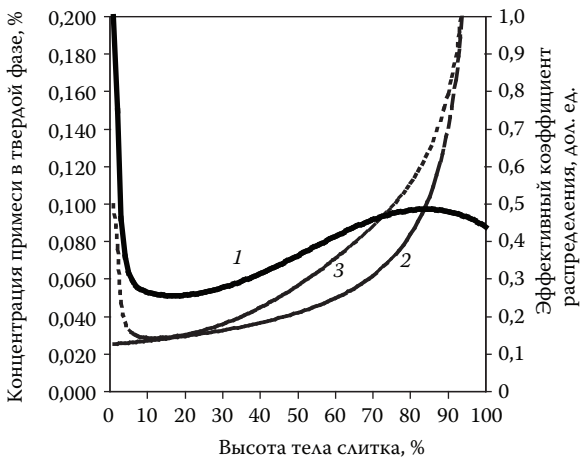

Рис. 6. **Изменение эффективного коэффициента распределения (*1*) и концентрации примеси по высоте слитка при постоянном (*2*) и зависящем от доли твердой фазы (*3*) коэффициентах распределения**

ется. Сравнение характера кривой на графике на рис. 6 с кривыми осевого распределения примеси на рис. 3 (для приведения к одному виду один из указанных рисунков следует повернуть на 90° и отразить относительно вертикали) показывает, что случай с изменяющимся значением k соответствует получаемому на практике. Таким образом, предложенная трактовка изменения химического состава осевой зоны слитка по его высоте является обоснованной.

Еще раз следует подчеркнуть, что использование подобной функциональной зависимости коэффициента распределения от доли твердой фазы является лишь инструментом демонстрации особенностей перераспределения примесей внутри слитка; применение подобного приема в расчетах затруднено, так как при этом следует задавать зависимость скорости затвердевания от толщины корочки для осевого и радиального направлений, кроме того, в последнем случае необходимо дополнительно учитывать изменение коэффициентов уравнения по высоте слитка или, по крайней мере, задавать их значение для трех частей слитка со значительно различающимися условиями затвердевания (донной, средней и подприбыльной).

Изменение концентрации примеси в радиальном направлении носит несколько иной характер. Как уже было сказано, по экспериментальным результатам в поперечном направлении по мере удаления от поверхности концентрация примесей убывает в донной части слитка; по-разному ведет себя в среднем сечении и значительно возрастает в подприбыльной области. Для трактовки характера изменения концентрации примеси вдоль радиуса слитка исходя из приведенных выше положений (для осевого распределения ликватов) рассмотрим изменение скорости затвердевания в поперечной плоскости слитка (рис. 7).

Из представленных на рис. 7 данных видно, что характер зависимости $v_{затв} = f(R)$ имеет U-образный характер с минимумом на удалении (0,5–0,7)R от поверхности. Причем диапазон изменения скорости затвердевания в горизонтальном направлении значительно меньше, чем в вертикальном. Так, если на удалении (0,1–1,0)R от поверхности скорость затвердевания составляет 0,025–0,30 см/с, то для горизонтальной скорости затвердевания диапазон ее изменения почти на порядок меньше и составляет около 0,005 см/с. Из этого следует, что, во-первых, зависимость скорости затвердевания в горизонтальном направлении от удаленности от поверхности слитка носит скорее L-образный характер, во-вторых, коэффициент распределения вдоль радиуса слитка изменяется незначительно, в связи с чем концентрация примесей также должна изменяться

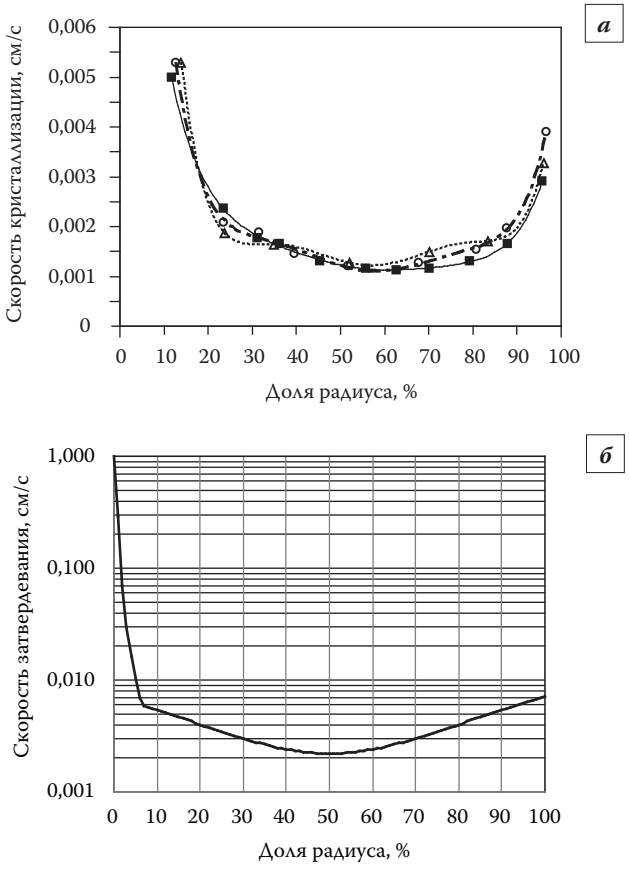

Рис. 7. **Изменение скорости роста твердой фазы в горизонтальном направлении:** *а* – в подприбыльном сечении для слитков массой 110 и 135 т из стали, содержащей 3,5% Ni–Cr–Mo–V [12] (обозначения см. рис. 5); *б* – общая схема изменения скорости роста твердой фазы в радиальном направлении

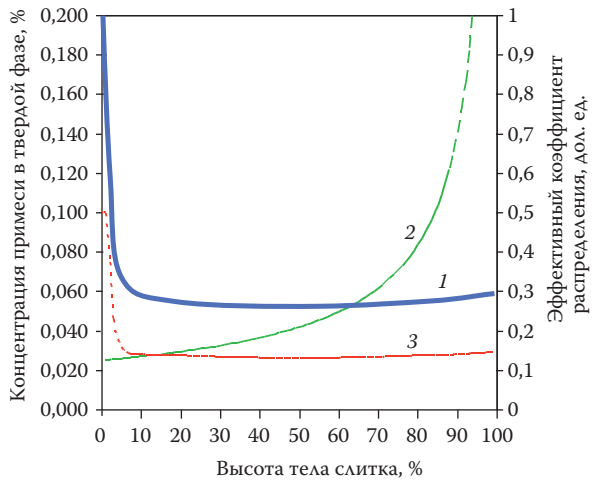

Рис. 8. **Изменение эффективного коэффициента распределения (*1*) и концентрации примеси по радиусу слитка при постоянном (*2*) и зависящем от доли твердой фазы (*3*) коэффициенте распределения**

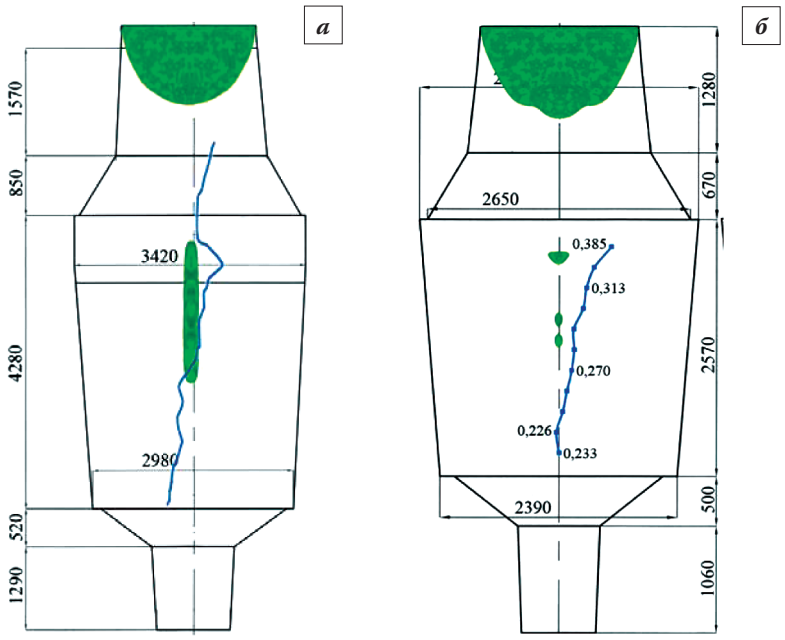

Рис. 9. **Геометрические размеры, химическая и физическая неоднородность слитков массой 360 т (*а*) из стали 25Х2НМФА и 142 т (*б*) [11, 12] из стали 25ХН3МФА [1] (точки у кривых – концентрация углерода, %; темные области в осевой части – участки осевой рыхлости)**

слабее, и характер ее распределения может определяться другими причинами.

Результаты расчета k по выражению (2) и $C_{S(i)}$ по (1) для случая изменения скорости затвердевания по отображенному на рис. 7, *б* закону приведены на рис. 8. Видно, что в соответствии с приведенными ранее рассуждениями для случая распределения примеси в вертикальном направлении вдоль оси слитка концентрация примеси в горизонтальном направлении по мере удаления от поверхности должна резко уменьшаться вблизи поверхности, а затем почти не изменяться. Однако, как было отмечено, на практике этого не происходит. Концентрация примеси в радиальном направлении по мере удаления от поверхности слитка убывает в придонном сечении, различно ведет себя в средней части и возрастает в подприбыльном сечении.

По-видимому, это расхождение связано с дополнительным накоплением примеси в расплаве в результате ее вытеснения при затвердевании нижерасположенных слоев металла. Следует отметить, что убывающий характер экспериментальной кривой изменения концентрации примеси свойственен именно донной части слитка, где количество примеси, вытесненной в расплав при затвердевании нижележащих слоев металла, минимально.

Таким образом, выше были рассмотрены особенности распределения ликватов в слитках в осевом и радиальном направлениях. На примере имеющихся экспериментальных данных описаны общие тенденции изменения профиля концентрации примесей в продольной и поперечной плоскостях слитка. Однако при этом не были рассмотрены некоторые частные особенности распределения ликватов. Например, наличие в определенных случаях на кривых распределения примеси по высоте и по радиусу

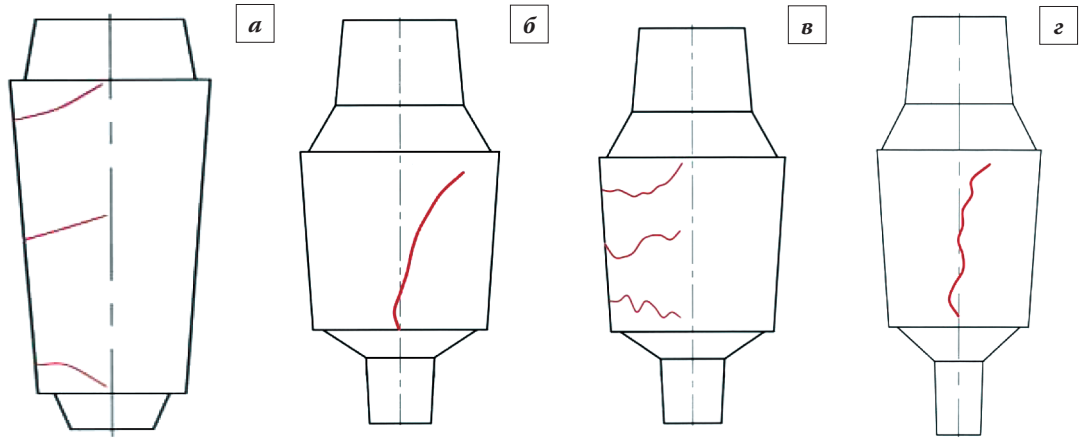

Рис. 10. **Типичное распределение ликватов в радиальном (*а*, *в*) и осевом направлениях (*б*, *г*) кузнечных слитков:** *а* – радиальное распределение концентрации примеси в слитках без шнуров внецентренной ликвации; *б* – осевое распределение ликватов в слитках без осевой рыхлости; *в* – радиальное распределение концентрации примеси в слитках, пораженных шнурами внецентренной ликвации; *г* – осевое распределение ликватов в слитках, пораженных осевой рыхлостью

слитка локальных экстремумов (см. рис. 3, *а*). И в том, и в другом случае это связано с невозможностью вывода в прибыльную часть обогащенной ликватами жидкости и, следовательно, ее захватом в теле слитка. Но если в радиальном направлении такой захват происходит на микроуровне и его возможность определяется параметрами дендритной структуры, зависящими прежде всего от скорости теплоотвода и состава разливаемого металла, то в вертикальном направлении наличие пиков на кривой распределения связано с захватом макрообъемов расплава, возможность которого зависит от формы жидкометаллической ванны, которая, в свою очередь, определяется геометрией слитка.

При наличии подобных пиков на кривой распределения разница значений концентрации примеси в приповерхностной и осевой зонах слитка меньше, чем в случае без них, так как захваченная примесь в этом случае не будет вытеснена в осевую зону и, соответственно, не повысит там свою концентрацию.

Следует подчеркнуть, что прямым следствием захвата ликватов в междендритном пространстве является образование шнуров внецентренной ликвации, поэтому на макротемплетах положение пиков концентрации ликватов можно определить по месту расположения шнуров. Теплофизические условия, необходимые для формирования подобных крупных изолированных дендритных ячеек, наличие которых может обусловить возможность формирования шнуров и экстремально повысить концентрацию ликватов по радиусу слитка, сформулированы в работе [1].

Справедливость предположения причин образования пиков концентрации на кривых распределения примеси по высоте осевой части слитка доказывает анализ экспериментальных данных о химической неоднородности слитков. На рис. 9 приведены результаты анализа распределения углерода по высоте осевой части слитков массой 360 и 142 т. Из представленных данных видно, что для слитка массой 360 т на этой кривой имеется большое число локальных экстремумов, тогда как кривая распределения углерода по высоте слитка массой 142 т относительно гладкая.

Оценка геометрии этих слитков по методике [13] на предмет выполнения условий направленного затвердевания показала, что в слитке массой 142 т они выполняются, тогда как в слитке массой 360 т – нет. Это подтверждают результаты компьютерного моделирования (темные области в осевой части слитков на рис. 9), показавшие, что в слитке массой 142 т зона осевой рыхлости (дефект слитка, наличие которого является следствием невыполнения условия направленного затвердевания) отсутствует, тогда как в слитке массой 360 т она имеет достаточно большие размеры.

Таким образом, экспериментальные данные подтверждают факт наличия пиков концентрации примеси на кривой осевого распределения для слитков, геометрия которых не обеспечивает условий для направленного затвердевания (см. рис. 9).

Следует обратить внимание на то, что, несмотря на обеспечение условий направленного затвердевания в слитке массой 142 т (для слитка массой 360 т данных о распределении примеси в радиальном направлении нет), из-за его больших поперечных размеров формирующаяся в процессе затвердевания дендритная структура оказывается достаточно крупной для захвата обогащенной ликватами жидкости в междендритном пространстве. В итоге это приводит к формированию шнуров и пиков концентрации ликватов на кривой радиального распределения (см. рис. 3, *а*).

Таким образом, качественный анализ химической неоднородности кузнечных слитков показал, что изменение концентрации ликватов в радиальном направлении в слитках без зоны шнуров внецентренной ликвации имеет убывающий характер в донной части, возрастающий в прибыли и различный (зависящий от количества примеси, накопленной в жидкости на предыдущих этапах затвердевания) в средней части (рис. 10, *а*). В осевом направлении распределение ликватов по высоте осевой зоны слитков, в которых обеспечиваются условия направленного затвердевания, до высоты 20–30% *H* имеет убывающий характер и далее возрастающий (рис. 10, *б*).

В случае если при затвердевании слитка возникают благоприятные условия для формирования шнуров внецентренной ликвации на кривых радиального распределения возникают пики концентрации, координаты которых совпадают с местом расположения шнуров (рис. 10, *в*). Аналогичные пики возникают на кривых распределения примеси по осевой части слитков, если их геометрия не обеспечивает направленного затвердевания (рис. 10, *г*).

Выводы. Проведен анализ имеющихся литературных данных о химической неоднородности

кузнечных слитков. Выявлены общие закономерности распределения ликватов в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Показано, что в осевом направлении в общем случае концентрация примеси сначала уменьшается до высоты примерно 0,25*H* от плоскости сочленения с кюмпелем, затем монотонно возрастает.

В радиальном направлении от периферии к центру концентрация ликватов уменьшается в донной части; по-разному ведет себя в среднем сечении и существенно возрастает в подприбыльном сечении; при этом содержание примеси в приповерхностных слоях слитка, как правило, слабо (на 10–15 отн. %) возрастает снизу вверх.

Обоснованы возможные причины подобного распределения примесей в кузнечных слитках.

Библиографический список

1. **Дуб В.С.** Исследование внецентренной ликвации и разработка методов подавления ее развития в крупных слитках. Дис. ... д-ра техн. наук. М. : ЦНИИТМАШ, 1980. Т. 1. 395 с.

2. **Макаров И.И.** Исследования параметров прибыли на кинетику затвердевания стали и формирование усадочных дефектов в крупных слитках. Дис. ... канд. техн. наук. М. : ЦНИИТМАШ, 1976. 175 с.

3. **Агеев Н.Д.** Исследование условий выплавки и разливки, строения и свойств крупного слитка. Отчет ЦНИИТМАШ. М., 1952. 86 с.

4. **Фоменко А.П.** Разработка и исследование малоприбыльного слитка с прямой конусностью стенок для производства сортового проката. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : ЦНИИчермет им. И.П.Бардина, 2007. 22 с.

5. **Мозговой А.В.** Оптимизация параметров стального слитка с улучшенными характеристиками осевой зоны для сортового проката большого диаметра. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : ЦНИИчермет им. И.П.Бардина, 2009. 22 с.

6. **Nishiguchi K., Nakanishi K., Nakayama K. et al.** Prediction on macro segregation in large forging ingots: IFM 1997. 13th Int. Forgemasters Meeting (Pusan, Korea. 12–16 Oct. 1997). P. 57–70.

7. **Sheil E.** Bemerkungen zur schicht kristallbildung // Zeitschrift fur Metallkunde. 1942. B. 34, No 3. S. 70–72.

8. **Burton J.A., Prim R.C., Clichter W.P.** // J. Chem. Phys. 1955. Vol. 33. P. 723.

9. **Yamamoto Y., Muto H., Akimoto Y. et al.** Solidification analysis of mod. 9Cr–1Mo steel: 17th Int. Forgemasters Meeting, IFM 2008 (Santander, Spanien, 3–7. Nov.).

10. **Tashiro K, Watanabe Sh., Tamura I. et al.** Influence of moued design on the solidification soundness of heavy forging Ingot // Transactions ISIJ. 1983. Vol. 23. P. 312–321.

11. **Дуб В.С., Макарычева Е.В., Макаров И.И.** Крупный слиток – настоящее и будущее // Электрометаллургия. 1999. № 5. С. 22–30.

12. **Дурынин В.А., Солнцев Ю.П.** Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса изделий из крупных поковок ответственного назначения. СПб. : Химиздат. 2006. 272 с.

13. **Назаратин В.В., Ромашкин А.Н, Иванов И.А. и др.** Методика проектирования кузнечных слитков без осевых усадочных дефектов // Металлургия машиностроения. 2010. № 3. С. 40–52.

INFLUENCE OF INGOT GEOMETRY ON ITS CHEMICAL HETEROGENEITY. Part I

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

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.