Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, С. Б. Гаманюк, М. В. Кириличев, М. С. Никитин
**ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ СЛИТКОВ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОКАТА***

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград
e-mail: tecmat@vstu.ru

В работе на основании данных компьютерного и физического моделирования предложена геометрия слитков, используемых для получения проката. Выбранная геометрия позволяет получить в затвердевшем металле структуру с благоприятным расположением физической и химической неоднородностей литого металла. Оценка применимости слитков показала, что уширенные сверху слитки целесообразно применять для получения сортового проката диаметром более 250 мм, уширенные снизу слитки для получения проката менее 250 мм.

Ключевые слова: затвердевание, моделирование, температурное поле, уширенный сверху слиток, уширенный снизу слиток, неметаллические включения, усадка, ликвация, прокат.

N. A. Zyuban, D. V. Rutskiy, S. B. Gamanyuk, M. V. Kirilichev, M. S. Nikitin
**FEATURES OF THE STRUCTURE OF INGOTS OF VARIOUS GEOMETRIES
AND THEIR APPLICATION FOR OBTAINING ROLLED PRODUCTS**

Volgograd State Technical University, Volgograd

In this paper, based on computer and physical modeling data, the geometry of ingots used to produce rolled products is proposed. The chosen geometry allows us to obtain a structure in the solidified metal with a favorable location of the physical and chemical inhomogeneities of the cast metal. The evaluation of the applicability of ingots showed that it is advisable to use the bars widened to the top for obtaining long products with a diameter of more than 250 mm, and the bars widened to the bottom for obtaining rolled products less than 250 mm.

Keywords: solidification, modeling, temperature field, expanded up ingot, expanded down ingot, non-metallic inclusions, shrinkage, liquation, rolling.

Металлургическая наследственность является первостепенным фактором, оказывающим влияние на качество стали. Существующие способы выплавки и внепечной обработки позволяют получить металлический расплав с низким содержанием примесей, однако этот положительный эффект можно частично, а в некоторых случаях полностью утратить на стадии

разливки и затвердевания стали. В связи с этим исследования, посвященные разработке способов, позволяющих повысить качество литого металла, остаются актуальными.

Для повышения качества металла слитков, отлитых в изложницы, разработано достаточно много способов [1–4], к которым можно отнести внешние воздействия (вибровоздействия),

введение микро- и макрохолодильников, инокулирование, изменение геометрии и технологии утепления, оптимизацию химического состава, низкую загрязненность и равномерное распределение неметаллических включений.

В работе на основании результатов физического моделирования [5] расчета температурных полей при затвердевании слитка [6], а также обработки полученных данных была предложена геометрия малоприбыльного слитка [7, 8] позволяющая получить качественный круглый прокат с минимальным развитием физической и химической неоднородностей литого металла и увеличенным выходом годного металла.

Целью работы являлось выявление особенностей внутреннего строения слитков различной геометрии и технологии утепления, позволяющих получить химически и физически однородный сортовой прокат.

Методика исследования

На основании компьютерного моделирования [9] были получены зависимости [10], описывающие влияние технологических параметров разлива на степень развития дефектов литого металла слитков. В результате были подобраны геометрические параметры, позволяющие получить слитки с оптимальным расположением дефектов литого металла (см. табл. 1).

Таблица 1

Параметры разработанных слитков

Масса слитка, т	H/D	$k_{изл}$, %	$V_{приб}$, %	$k_{приб}$, %	λ_f , Вт/(м·К)	ΔT , °C	$\lambda_{см}$, Вт/(м·К)
7,0 [11]	2,07	7,5	13,0	22,0	1,78	30	0,35
5,9 [8]	2,61	-3,7	9,3	3,7	0,30	60	0,02

Промышленные слитки отливались в условиях ЭСПЦ завода «Красный Октябрь» (г. Волгоград) по следующей схеме: выплавка полупродукта в основной дуговой печи с низким содержанием С и Р → доведение до окончательного химического состава на печи-ковше с низ-

ким содержанием S → вакуумирование стали на установке вакуумирования где обеспечивали содержание водорода в стали не более 2,5 ppm → сифонная разливка в изложницы. Химический состав приведен в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав сталей

Форма слитка	C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %	Cr, %	Ni, %	Cu, %
Уширенный кверху 7,0 т [11]	0,22	0,55	0,27	0,014	0,018	0,21	0,15	0,16
Уширенный книзу 5,9 т [8]	0,20	0,53	0,24	0,012	0,017	0,17	0,11	0,16

После затвердевания из двух слитков (уширенный кверху и уширенный книзу слитки) вырезана осевая плита, которая впоследствии разрезалась на макротемплеты. Химический состав по сечению слитков определялся спектральным методом в результате расчета среднего из пяти точек определения состава на одном образце с использованием спектрометра ARL 3460. Погрешность измерений составляла 0,0001 %. Расчет степени ликвации производится по формуле

$$\alpha_c = \frac{c_f - c_k}{c_k} \cdot 100 \%,$$

где c_f – фактическое содержание элемента, %; c_k – плавочное содержание элемента, %.

Загрязненность неметаллическими включениями оценивалась по ГОСТ 1778-70 (метод Л).

Ошибка при определении загрязненности составляла 0,00025 %. Идентификация включений проводилась методами оптической (Leica 8 C) и электронной микроскопии (FEI Versa 3D).

Результаты работы и их обсуждение

Физическим и компьютерным моделированием установлена геометрия, позволяющая получать слитки с минимальным развитием дефектов усадочного происхождения, а также малоприбыльные слитки с их оптимальным развитием, имеющие благоприятное расположение в теле слитка. В работе [10] проведено сопоставление результатов моделирования с результатами исследования степени развития структурных и дефектных зон и показано их совпадение. Установлено, что для получения «благо-

приятного» расположения дефектов усадочно-го происхождения при минимально допустимом объеме прибыли необходимо организовать процесс продвижения твердой фазы таким образом, чтобы в подприбыльной части происходило опережающее смыкание продвигающегося фронта затвердевания от стенок изложницы.

Расчет температурных полей в процессе затвердевания (см. рис. 1) показал, что продвижение фронта затвердевания в уширенном

кверху слитке идет направленно. В последнюю очередь затвердевает осевая зона (через 2 часа после окончания заливки, см. рис. 1, а), ее затвердевание происходит в неблагоприятных условиях; при этом в осевой части образуется протяженная двухфазная зона сравнительно небольшого диаметра (см. рис. 1, а), затвердевание которой сопровождается развитием явления усадки металла с одновременной «подпиткой» ее расплавом из прибыльной части и развитием зоны осевой рыхлости.

Рис. 1. Температурное поле по сечению слитков массой 7,00 т (а) и 5,90 т (б) [6]

Распределение температурных полей в уширенном книзу слитке отличается от сравнительного слитка (см. рис. 1, б). В начальные моменты времени (30 мин – 1 ч) затвердевание в верхней и нижней частях протекает равномерно, при этом интенсивность затвердевания от стенок происходит равномерно, по высоте и сечению слитка. С увеличением длительности затвердевания (1 ч 30 мин) происходит сужение осевого канала жидкого расплава в подприбыльной части, при этом на нижних горизонтах интенсивность затвердевания уменьшается (см. рис. 1, б). С увеличением времени затвердевания из-за меньшего поперечного сечения (585 мм) в верхней части (в сравниваемом слитке 712 мм) происходит смыкание противоположных фронтов затвердевания (1 ч 45 мин) (см. рис. 1, б). В момент образования моста плотного металла ме-

таллический расплав в прибыли участвует в подпитке только вышележащих горизонтов, через 2 часа после окончания разливки в прибыли остается около 9 % жидкого расплава, при этом в замкнутой осевой части слитка температура составляет 1485 °С (см. рис. 1, б). Это свидетельствует о хорошей работе прибыли и высокой эффективности использованных теплоизоляционных материалов.

Химическая неоднородность слитка массой 7,00 т является классической (см. рис. 2, а) – пониженное содержание углерода, серы и фосфора в нижней части слитка и повышенное содержание в верхней подприбыльной области, что обусловлено описанными выше условиями затвердевания и особенностями продвижения твердой фазы.

В уширенном книзу слитке картина распределения ликватов иная (см. рис. 2, б).

Рис. 2. Химическая неоднородность исследуемых слитков:
а – обычный прибыльный слиток массой 6,57 т стали 20; б – слиток с прямой конусностью стенок массой 5,9 т стали 20

В целом суммарная ликвация по высоте осевых зон, между верхним и нижним горизонтами, значительно меньше развита в слитке уширенном книзу. Для углерода эта величина составляет 5 % (при 35 % в традиционном слитке), для серы 9 % (28 %), для фосфора 5 % (25 %).

Изменение химического состава по оси слит-

ка, представленное на рис. 3, показывает, что с увеличением высоты слитка распределение ликватов неоднородно. В нижней части содержание ликватов ниже марочного состава стали, при увеличении высоты слитка их содержание постепенно возрастает, достигая максимума в прибыльной части.

Рис. 3. Распределение неметаллических включений в слитке массой 5,9 т стали 20

При приближении к высоте, соответствующей высоте окончания вторичной усадочной раковины и началу плотного подприбыльного моста литого металла содержание углерода, серы и фосфора снижается до 0,14, 0,015 и 0,013 % соответственно, что на 30, 31,8 и 35 % ниже плавочного состава. С приближением к верхним прибыльным горизонтам слитка содержание ликватов постепенно увеличивается, достигая максимума в прибыли. Ликвация углерода, серы и фосфора составляет 110,0; 145,4 и 45 % соответственно.

Идентификация неметаллических включений методами оптической и электронной микроскопии позволила выявить три вида включений: оксиды, сульфиды и окисульфиды. Преобладающим видом включений являются третичные окисульфидные неметаллические включения, в основе содержащие алюминаты кальция типа $x(\text{CaO}) \cdot y(\text{Al}_2\text{O}_3)$ в оболочке (MnS) 49 % и сульфидные включения (MnS) 48 % от общего количества неметаллических включений. Оксиды представлены первичными включениями (Al_2O_3), содержание которых не превышает 3 % от общего количества неметаллических включений. Включения имеют небольшой размер (не более 20 мкм), глобулярную форму; сульфиды имеют вытянутую форму максимальной протяженностью 30 мкм и располагаются по границам зерна. Изменение характера продвижения температурных полей в уширенном книзу слитке оказало воздействие на особенности распределения неметаллических включений. Оценка общей загрязненности (см. рис. 3) показала, что в целом по высоте уширенного книзу слитка распределение включений не отличается от распределения в уширенномверху слитке. Максимальная загрязненность неметаллическими включениями верхней части слитка с замедленным затвердеванием прибыльной части способствует всплыванию включений.

Загрязненность сульфидами на верхнем и нижнем горизонтах от края к центру слитка уменьшается, а на среднем горизонте – увеличивается. Уменьшение количества сульфидов на верхнем горизонте и их увеличение на среднем можно объяснить следующим образом. В верхней части к моменту окончания затвердевания образуется мост плотного металла (см. рис. 3, б), в результате чего в центре слитка образуется изолированный от прибыльной части объем жидкого металла, который затвердевает в условиях отсутствия подпитки расплавом. В результате этого происходит обогащение границ закрытой раковины неметаллическими

включениями (см. рис. 3), таким образом, сульфиды не успевают всплыть в прибыльную часть слитка и остаются на среднем горизонте. Распределение окисульфидных неметаллических включений имеет идентичный характер распределения с сульфидами, кроме середины слитка. На среднем горизонте при минимальном содержании оксидов, израсходованных на образование окисульфидов, в поверхностных слоях при дальнейшем затвердевании (приближение к оси слитка) выделяется только чистая сульфидная фаза (MnS), при этом загрязненность окисульфидами уменьшается.

Количество оксидов на нижнем горизонте слитка выше, за счет чего загрязненность от поверхности к оси слитка увеличивается. Повышенное содержание тугоплавких оксидных включений небольшого размера (не более 20 мкм), их оседание в нижнюю часть слитка и гидростатическое давление столба жидкого металла не позволяют оксидным включениям всплывать в прибыльную часть, что приводит к их захвату продвигающимся фронтом затвердевания.

Опробование уширенного книзу слитка показало существенное повышение качества круглого проката диаметром не более 200 мм, с отсутствием внутренних дефектов, что делает опытный слиток применимым для получения круглого проката. Ультразвуковой контроль готового металлопроката не выявил внутренних дефектов.

Опытно-промышленное опробование уширенного книзу слитка массой 5,9 т, проведенное авторами работы, показало существенное улучшение качества получаемого из него металлопроката диаметром 120 и 200 мм, в котором отсутствует закрытая усадочная раковина, завариваемая при прокатке.

Исследование макроструктуры проката показало, что металл соответствует требованиям, предъявляемым к данному виду продукции, не имеет следов вторичной усадочной раковины, рыхлости, внутренних трещин, шлаковых включений и т. д. То есть при величине обжатия более 10 вторичная усадочная раковина, имеющая значительное развитие по длине и небольшую величину раскрытия, гарантированно заваривается, что делает опытный слиток предпочтительным для получения сортового проката диаметром не более 200 мм.

Данные макроконтроля подтверждаются результатами ультразвукового контроля металлопроката из опытных слитков, который не выявил внутренних дефектов.

Результаты взвешивания головной и донной обрезы представлены в табл. 3.

Таблица 3

Баланс металла при получении круглого проката

Тип слитка	Головная обреза		Донная обреза		Суммарная обреза		Годная часть	
	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%
Уширенный книзу 5,9 т	449	7,6	231	3,9	662	11,5	5187	88,5
Уширенный сверху 7,0 т	920	14,0	138	2,1	1058	16,1	5512	83,9

Использование малоприбыльного слитка позволяет повысить выход годного металла на 4,6 %. Одновременно с уменьшением головной обреза применение данного слитка позволяет получать плотную макроструктуру сортового проката.

В уширенном сверху слитке массой 7,0 т ликвирующие примеси имеют классическое распределение (см. рис. 2, а). Организация направленного затвердевания уширенного сверху слитка (см. рис. 1), обусловленная его геометрией (см. табл. 1) и утеплением, позволяет по-

лучить минимальное развитие дефектов усадочного происхождения (осевая пористость, рыхлость и т. д.), которые завариваются при последующем переделе (прокате). Однако химическая неоднородность не устранялась, что приводило к увеличению величины головной обреза. Уширенный книзу слиток имеет более высокую химическую однородность (см. табл. 4), что при малом объеме прибыли позволяет получить по сечению проката снижение ликвации углерода в 1,7 раза, серы и фосфора – в 1,2 и 1,6 раза соответственно (см. табл. 4).

Таблица 4

Химическая неоднородность литого металла и проката

Высота слитка, мм	Степень ликвации, %*		
	C	S	P
300/250	-10,0/-15,0	-7,0/-32,0	-8,0/-25,0
1100/900	+10,0/+10,0	+14,0/+4,5	+8,0/+5,0
1900/1680	+25,0/-10,0	+21,0/-22,7	+17,0/-20,0
Степень ликвации в прокате (литера А – головная часть слитка)	+15,0/-5,0	+21,0/-4,5	+16,0/-5,0
Степень ликвации в прокате (литера Н – донная часть слитка)	-10,0/-10,0	-7,0/-18,0	-8,0/-10,0

* В числителе – уширенный сверху слиток массой 7,0 т; в знаменателе – уширенный книзу слиток массой 5,9 т.

Усредненный анализ результатов проката слитков показал, что использование малоприбыльного слитка позволяет повысить выход годного металла на 4,6 %. Одновременно с уменьшением головной обреза применение данного слитка дает возможность получить плотную макроструктуру проката.

Выводы

Исследование особенностей строения слитков различной геометрии показало, что характерной особенностью уширенного книзу малоприбыльного слитка является наличие протяженной закрытой усадочной раковины и более высокая химическая однородность литого металла. Распределение неметаллических включений на верхнем и нижнем горизонтах уменьшается от поверхности к оси слитка, на среднем горизонте увеличивается, что согласуется

с данными изменения степени ликвации. Уменьшение количества сульфидов на верхнем горизонте и их увеличение на среднем объясняется образованием моста плотного металла, в результате чего в центре образуется изолированный от прибыли объем жидкого металла, который затвердевает в неблагоприятных условиях, вследствие чего происходит обогащение границ закрытой раковины неметаллическими включениями (таким образом, сульфиды не успевают всплыть в прибыльную часть слитка и остаются на среднем горизонте).

Проведенное исследование особенностей строения уширенного сверху слитка показало, что его использование позволяет наряду с увеличением выхода годного металла (за счет снижения отходов с головной части до 9,3 %) получать более качественный металлопрокат за счет рациональной формы физической неоднородно-

сти и благоприятного расположения ликвидирующих примесей и неметаллических включений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. A Numerical Study of the Effect of Multiple Pouring on Macrosegregation in a 438-Ton SteelIngot / Duan Zhen-Hu, Shen Hou-Fa, Liu Bai-Cheng // Acta metallurgica sinica english letters. 2015. – Vol 28. – N 9. – p. 1123–1133.

2. Жульев, С. И. Влияние инокулирования на структуру и химическую однородность крупного кузнечного слитка стали 38ХНЗМФА / С. И. Жульев, В. Ф. Петрова, К. Е. Титов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 3. – С. 23–26.

3. Изучение влияния конфигурации кузнечных слитков на распределение химических элементов по их сечению / В. С. Дуб [и др.] // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2014. – № 1. – С. 5–18.

4. Критерий оценки склонности стали к ликвации в кузнечных слитках / А. Н. Ромашкин [и др.] // Металлург. – 2017. – № 10. – С. 35–40.

5. Физическое моделирование процесса затвердевания крупных слитков различной геометрии / Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, С. Б. Гаманюк, К. Е. Титов, М. В. Кириличев, Е. А. Косова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 7 (230) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Металлургия»). – С. 58–63.

6. Исследование особенностей затвердевания слитков

различной геометрии и утеплением прибыльной части на основе математического моделирования / Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, М. Ю. Чубуков [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6(201) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 138–145.

7. Исследование особенностей строения литого металла слитков различной геометрии, используемых для получения круглого проката / Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, С. Б. Гаманюк, М. В. Кириличев // Черные металлы (Chernye Metally). – 2019. – № 5 (1049). – С. 6–13.

8. Патент на изобретение 2285579, РФ, МПК В 22 D 7/10 / Устройство для отливки стальных слитков / Жульев С. И., Фоменко А. П., Руцкий Д. В., Федоров Д. Н. – Оpubл. 20.10.06. Бюл. № 29.

9. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013613206 от 28.03.2013 г. РФ, МПК (нет). Система компьютерного моделирования «Crystal» / В. П. Багмутов, И. Н. Захаров, Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, С. Б. Гаманюк ; ВолгГТУ. 2013.

10. Руцкий, Д. В. Определение геометрии слитков с минимальным развитием дефектов осевой зоны и их применение для получения сортового проката диаметром более 300 мм / Д. В. Руцкий, Н.А. Зюбан, С. Б. Гаманюк [и др.] // Металлург. – 2018. – № 11. – С. 33–39.

11. Патент на полезную модель 84759, РФ, МПК В 22 D 7/06. Изложница для стального слитка / Мозговой А. В., Зюбан Н. А., Руцкий Д. В., Федоров Д. Н., Кнохин В. Г. – Оpubл. 20.07.2009. Бюл. № 20.