

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.774.04

Великоцкий Р.Е., Сумец А.В., Шабрацкий С.В., Малахида В.С.

## МЕТАЛЛОВЕДЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИЧИН ОТСОРТИРОВКИ НА ЗАЧИСТКУ ПОВЕРХНОСТИ КВАДРАТНОЙ ЗАГОТОВКИ СТАЛИ 3пс С ЭЛЕМЕНТАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Аннотация.** В работе проанализировано влияние технологических параметров на отсортровку на зачистку поверхности квадратной заготовки и разработка рекомендаций по минимизации уровня отсортровки по поверхностным дефектам стали 3пс. Отрицательная ликвация углерода, серы и фосфора отмечена, как в нижнем, так и в верхнем (подрибыльном) сечении слитка в области моста плотного металла. В прибыльной части слитка содержание этих элементов возрастает. Изменение химического состава по оси слитка 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. Анализ результатов общей загрязненности литого металла различными видами включений показал, что преобладающим видом включений являются оксисульфиды, а затем по степени убывания сульфиды и оксиды. Анализ параметров литой структуры металла показал, что с увеличением расстояния от бокового края к оси слитка значение межосного расстояния на верхнем и среднем горизонте увеличивается, а на нижнем уменьшается. Характер изменения объемной доли дендритов имеет обратную зависимость от межосного расстояния. Оценка микроструктуры показала, что в слитке наблюдается видманитеттова ферритная структура. Причем с увеличением расстояния от поверхности раковины игольчатая структура феррита становится более выраженной. По мере затвердевания интенсивность продвижения твердой фазы уменьшается, межосное расстояние возрастает, плотность осей кристаллов увеличивается. В результате создаются благоприятные условия для выделения неметаллических включений в прилегающих к стенкам усадочной раковины слоях металла, что выражается в увеличении общей загрязненности неметаллическими включениями. Увеличение содержания включений в слоях, прилегающих к поверхности вторичной усадочной раковины на верхних горизонтах, становится более выраженным. Основной причиной распределения ликватов по высоте слитка является различная скорость и условия затвердевания на различных горизонтах слитка. На развитие зональной неоднородности большое влияние оказывает высота и сечение слитка, и чем они больше, тем сильнее развивается макроликвация. Геометрические параметры  $H/D$  и конусность практически полностью определяют зональное строение и структурные особенности затвердевающего слитка, и управление этими параметрами обеспечивает возможность получения заготовок с заданной структурой и контролируемым расположением дефектов.

**Ключевые слова:** сталь 3пс, отсортровка на зачистку, ликвационные процессы, макроликвация, квадратная заготовка, геометрические параметры и конусность изложницы

Проблемам затвердевания металлов и сплавов и образованию поверхностных дефектов кристаллизационного и ликвационного происхождения посвящены многочисленные работы известных отечественных и зарубежных учёных [1-4].

На основе их исследований выдвинуто множество гипотез образования рассматриваемых дефектов. Предложены научные разработки и технологические решения, позволяющие приблизить качество крупных объемов металла к необходимым требованиям. Наибольшее распространение получают методы снижения загрязненности металлического расплава вредными примесями с помощью применения методов рафинирования металла на стадии выплавки. Положительный эффект получения чистого по вредным примесям металлического расплава значительно снижается при затвердевании разлитого в изложницы металла в течение длительного времени, в результате чего значительное развитие приобретают ликвационные и усадочные явления, которые увеличивают химическую и физическую неоднородность литого металла.

В последнее время с целью количественного описания процессов, происходящих при разливе и кристаллизации стали, активно используются методы математического и физического моделирования, однако вследствие наложения граничных, начальных или иных условий получаемые модели не всегда достаточно полно отражают реальную картину процесса, что несколько ограничивает возможности их активного использования в промышленных условиях, с другой стороны, они всегда должны дополняться реальными исследованиями получаемого металла. Поэтому главным направлением повышения качества поверхности горячекатаного металла является дальнейшее совершенствование технологии производства крупных слитков на основе проведения более глубоких исследований по кристаллизации больших масс металла и формированию внутренних дефектов усадочного и ликвационного происхождения, в том числе и с привлечением методов математического моделирования и комплексного металлургического анализа.

При анализе качества металла до недавнего времени считалось, что более высокие показатели характерны для слитков, отлитых сверху, почему этот способ и рекомендовался при разливе слитков в боль-

шинстве случаев. Однако практика последних лет показала, что при выполнении соответствующих мероприятий сталь, отлитая сифоном, не отличается по содержанию неметаллических включений от стали, разлитой сверху. Это достигается, прежде всего, применением высококачественного огнеупорного кирпича и тщательной сборкой канавы или состава. В настоящее время этот способ разливки достаточно широко распространен, особенно при разливке качественной стали, и является незаменимым при разливке стали в мелкие слитки. Кроме того, этот способ начинают применять при отливке крупных слитков. Так, в Чехии на заводе «Pilsen steel» разработана и используется технология отливки сифоном слитка массой 170 т [3], что свидетельствует о больших перспективах и преимуществах этого способа по сравнению с разливкой металла сверху. Способ непрерывной разливки предназначен в основном для получения проката сталей широкого потребления, и его доля в общей структуре сталеплавильного производства промышленно развитых стран составляет от 80 до 95%. Особенности кристаллизации и формирования структуры непрерывнолитой заготовки существенно отличаются от процесса затвердевания слитка в изложнице и достаточно широко освещаются в специальной литературе по непрерывной разливке сталей [2, 5].

Одним из важнейших параметров при выборе геометрии слитка является организация направленного затвердевания, позволяющая получить слиток с минимальным развитием внутренних дефектов. В работах сотрудников АО НПО «ЦНИИТМАШ» [6] приведены уточняющие расчеты параметров слитка, основанные на использовании величины «приведенного радиуса», предложенного Н.И. Хворинным [7]. Расчеты показали возможность получения слитка с плотной осевой зоной при отношении  $H/D \leq 2,1$  и конусностью, достигающей 15%. Полученные результаты подтверждают общеизвестные литературные данные [7-9] по влиянию конусности на направленность процесса затвердевания. Многолетняя практика работы металлургических заводов показала, что оптимальную конусность изложниц выбирают в пределах 2,7–4,0%. Такой наклон граней обеспечивает вполне удовлетворительную макроструктуру слитков и практически не снижает производительность кузнечнопрессового оборудования.

Важнейшим критерием геометрических параметров слитка является отношение  $H/D$ . Именно оно определяет характер кристаллизации слитка, тип образующейся структуры, наличие осевых дефектов и т.п. В работе [10] проведен анализ воздействия параметра  $H/D$  на особенности формирования строения и структуры слитка, результаты которого представлены в виде обобщенной схемы влияния  $H/D$  на характер кристаллизации и формирование структуры слитков.

Формирование осевой зоны зависит от соответствующей конфигурации слитка. Так, для укороченных слитков, частично затвердевающих по механизму

объемной кристаллизации, характерно наличие более или менее развитой внеосевой  $\Lambda$ -образной неоднородности, менее развитой V-образной неоднородности и относительно высокой плотности осевой зоны, что обусловлено соблюдением принципа направленности затвердевания в вертикальном направлении слитка при данных условиях кристаллизации.

В удлиненных слитках со сплошной зоной транскристаллизации соблюдение принципа направленности затвердевания возможно только в горизонтальном направлении. В этих слитках проявляется резко выраженная V-образная неоднородность и неплотность осевой зоны, большое скопление дефектов, что связано с крайне неблагоприятными условиями кристаллизации осевых объемов металла.

Таким образом, отношение  $H/D$  является важнейшей интегральной характеристикой слитка, описывающей не только его геометрическую форму, но и определяющей особенности кристаллизации слитков различной конфигурации. В работах А.Н. Ромашкина, В.С. Дуба, А.Н. Мальгинова и других исследователей [11, 12] приведены результаты обработки большого массива теоретических и экспериментальных данных, имеющихся в лаборатории крупного слитка АО «НПО «ЦНИИТМАШ».

На основе математического моделирования показано, что осевая пористость в слитке массой 65 т стали марки 10Г2Н2МФА монотонно уменьшается при снижении  $H/D$ , что при значении  $H/D = 1$  объем осевой рыхлости при любых значениях конусности. При конусности 18% объем равен нулю при любом значении и увеличении конусности.

В исследованиях К.Е. Титова и Е.И. Бузинова [13, 14] с помощью компьютерного моделирования проведен анализ геометрии слитка на его химическую и физическую неоднородность. Установлено, что слиток будет максимально однороден с наибольшей отношением  $H/D$  и нулевой конусностью. Д.Н. Федоровым с коллегами [15] на основании обработки литературных данных и собственных исследований установлено, что с целью исключения осевой рыхлости для сплошных поковок типа валов требуются слитки с отношением  $H/D$ , близким к 1 или имеющим увеличенную конусность.

В слитках, предназначенных для полых заготовок (обечайки корпусов реакторов, кольца, трубы и т. п.), где осевая зона удаляется при прошивке слитка, необходимо стремиться к максимальному значению  $H/D$  и меньшей конусности, что, кроме того, обеспечивает и повышение химической однородности слитка.

Наблюдаемая закономерность объясняется преимущественной последовательной кристаллизацией металла от развитой боковой поверхности, соединением растущих фронтов в оси слитка и недостаточной пропиткой узкой протяженной осевой зоны из прибыли.

Влияние параметра  $H/D$  на продолжительность затвердевания и косвенно на физическую однородность слитка описывается формулой В. М. Тагеева [16]:

$$\tau = 1,48 \cdot \left( \frac{m_{\text{сл}}}{H/D} \right)^{2/3}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время полного затвердевания, ч;  $m_{\text{сл}}$  – масса слитка, т;  $H$  – высота тела слитка, мм;  $D$  – средний приведенный диаметр тела слитка, мм.

Необходимо отметить, что повышенная продолжительность затвердевания укороченных слитков по сравнению с удлиненными может приводить к чрезмерному развитию ликвационных процессов, проявляющихся в виде объемной и особенно зональной ликвации, что отрицательно сказывается на качестве кованных изделий.

Не менее важным является влияние параметра  $H/D$  на диаметр дефектных областей слитка, поскольку именно диаметром осевой неоднородности определяется возможность использования слитка для производства полых изделий. Удлиненные слитки имеют узкую усадочную рыхлость, что позволяет их использовать для производства полых длинномерных поковок. Кроме того, удлиненные слитки наиболее экономичны, что связано с меньшим объемом прибыли, по сравнению с укороченными.

Вместе с тем применение удлиненных слитков для таких типов поковок позволяет обеспечить оптимальную величину укова. Это связано с тем, что при ковке заготовок из слитков с  $H/D < 2$  уков зачастую достигает значительных величин, что ухудшает качество металла готовых изделий. В работе [17] указано, что при более сильном обжати пластические свойства падают, с увеличением укова растет анизотропия свойств.

Существенное влияние на формирование осевой зоны слитка оказывает его средний диаметр. Объясняется это тем, что с ростом толщины твердой корки интенсивность теплоотвода от фронта затвердевания уменьшается и снижается градиент температур в жидкой фазе, что приводит к образованию широкой двухфазной зоны. Поэтому с увеличением диаметра поперечного сечения слитка усиливается физическая неоднородность вдоль его оси. Ширина пористой зоны может быть рассчитана по формуле [18]

$$\xi = R \cdot \left( 1 + \frac{1}{\text{Био}} \right) \cdot \frac{t_{\text{кр}} - t_{\text{с}}}{t_{\text{кр}} - t_{\text{изл}}}, \quad (2)$$

где  $\xi$  – ширина пористой зоны, м;  $R$  – радиус слитка, м;  $\text{Био}$  – критерий Био;  $t_{\text{кр}}$  – температура образования твердо-жидкой зоны, °С;  $t_{\text{с}}$  – температура солидус стали, °С;  $t_{\text{изл}}$  – начальная температура изложницы, °С.

Следующим параметром, характеризующим геометрию кузнечного слитка, является конусность. В работе Д.Н. Федорова [19] отмечено уменьшение осевой неоднородности в укороченных слитках с увеличенной геометрической конусностью стенок, что подтверждается результатами исследований.

Однако наряду с уплотнением осевого строения слитки с повышенной конусностью характеризуются

усилением внеосевой и зональной ликвации [9, 16]. Несмотря на положительное влияние увеличения геометрической конусности, такие слитки сложны для дальнейшей обработки.

В работах [14, 20] авторами на основании разработанного ими критерия дефектообразования в программном комплексе «KRISTAL» проведено математическое моделирование на примере слитков массой 25,3 т. Объем прибыли всех этих слитков составляет 17%.

При затвердевании слитка из-за явлений усадки, приводящей к возникновению физической неоднородности (V-образные трещины, рыхлость, пустоты и т. п.), получает значительное развитие ликвация. Процессы развития дендритной ликвации достаточно просто воспроизвести на натуральных образцах в лабораторных условиях, что невозможно для зональной ликвации, характерной обычно для крупных отливок и слитков. При этом с повышением массы слитка дефекты, связанные с зональной ликвацией, резко увеличиваются.

В затвердевающем крупном слитке спокойной стали значительное развитие получает макроликвация, как по высоте, так и по сечению слитка.

На развитие химической неоднородности, кроме массы слитка, оказывает влияние его геометрия, которая в значительной мере также обуславливает и строение слитка [10].

Для определения закономерностей ликвации элементов в слитке были обработаны данные изменения химического состава по высоте и сечению слитков различной массы, отлитых в различное время на ФГУП «ПО «Баррикады». Поверхностные слои слитка по составу практически не отличаются от ковшевой пробы. В нижней части слитка ликвация большей своей частью принимает отрицательное значение. Ликвация углерода меняет свой знак с «+» на «-» приблизительно на 20% от радиуса слитка. Зона пониженного содержания элементов приобретает конусообразный вид с переходом в верхние горизонты слитка, при этом границы зоны отрицательной ликвации совпадают со структурными границами конуса осаждения, имеющего структуру мелких глобулярных дендритов [21, 22]. В средней части слитка ликвация элементов колеблется в интервале от – 5 до +10%.

В головной части слитка содержание углерода от периферии к центру повышается. Тепловая работа прибыльной надставки, а также увеличенный диаметр верхней части тела слитка приводит к увеличению макроликвации.

Обработка данных по влиянию высоты слитка на ликвацию углерода в нём показала наличие зоны отрицательной ликвации углерода, в нижней части слитков отрицательная ликвация достигает – 40%, высота, до которой распространяется область отрицательной ликвации 40%, от высоты тела слитка. В верхней части тела слитка ликвация достигает 60%.

Причиной такого распределения ликватов по высоте слитка, как было показано ранее, является раз-

Перечень исследованных  $tf$ 

№ п/п	Наименование $tf$	Ед. изм.
1	Углерод	%
2	Марганец	%
3	Кремний	%
4	Сера	%
5	Фосфор	%
6	Температура на повалке	°С
7	Температура ОРСС	°С
8	Продувка аргоном в ОРСС	мин
9	Искрение	с
10	Мениск	-
11	Оборот состава	кол-во/сутки
12	На УКП	мин
13	Углерод на повалке	%
14	Из-под толкателя слитков	кол-во слитков
15	Блюмы с расслоением	кол-во блюмов
16	Запороченность блюмов дефектами	%

#### Результаты металловедческого анализа

Отрицательная ликвация углерода, серы и фосфора отмечена как в нижнем, так и в верхнем (подприбыльном) сечении слитка в области моста плотного металла. В прибыльной части слитка содержание этих элементов возрастает. Изменение химического состава по оси слитка 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. При приближении к высоте, соответствующей высоте окончания вторичной усадочной раковины и началу плотного подприбыльного моста литого металла, содержание С, S, Р снижается, что на 30, 31,8, 35% ниже плавочного состава. С приближением к верхним прибыльным горизонтам слитка содержание ликватов постепенно увеличивается, достигая максимума в прибыли, ликвация С, S, Р, в которой составляет 110,0, 145,4, 45% соответственно.

Анализ результатов общей загрязненности литого металла различными видами включений показал, что преобладающим видом включений являются оксисульфиды, а затем по степени убывания – сульфиды и оксиды. Это связано с тем, что гетерогенное образование зародышей облегчается за счёт меньших энергетических затрат, и сульфиды зарождаются на уже готовых поверхностях оксидов. Все виды включений имеют сложный состав, преимущественно глобулярную форму и случайное расположение.

Наибольшую загрязненность неметаллическими включениями имеет верхний горизонт. Это связано с тем, что наиболее интенсивно охлаждающиеся в непосредственной близости к щетке растущих кри-

личная скорость и условия затвердевания на различных горизонтах слитка.

Из вышеизложенного следует, что на развитие зональной неоднородности большое влияние оказывает высота и диаметр слитка, и чем они больше, тем сильнее развивается макроликвация.

Прежде всего, необходимо отметить, что полученные данные также выявляют общую закономерность распределения углерода, характерную для всех слитков, – это увеличение содержания углерода от периферии к центральной зоне и от низа слитка к верху.

Важное значение имеют различия в деталях центральной зоны, составляющие индивидуальные особенности слитков. Здесь, прежде всего, обращает на себя внимание значительная разница в размерах области конуса осаждения с отрицательной ликвацией углерода, в том числе и той ее части, которая размещается в теле слитка.

При проведении испытаний механических свойств поковок [1, 23] замечено большое несоответствие величин прочностных и пластических свойств по противоположным концам изделий. Такое различие свойств обусловлено меньшим содержанием углерода с первого конца поковки (нижняя часть слитка) относительно его содержания в ковшевой пробе, и большим содержанием углерода со второго конца поковки (верхняя часть слитка).

Причиной неравномерного содержания углерода в поковке является высокая химическая неоднородность слитка, из которого изготавливается поковка.

Таким образом, геометрические параметры Н/Д и конусность практически полностью определяют зональное строение и структурные особенности затвердевающего слитка, и управление этими параметрами обеспечивает возможность получения заготовок с заданной структурой и контролируемым расположением дефектов.

На основании вышеизложенного основной целью работы является определение степени влияния технологических параметров на отсортировку, на зачистку поверхности квадратной заготовки и разработка рекомендаций по минимизации уровня отсортировки по поверхностным дефектам.

Комплексный математический анализ производился на основании 160 плавок стали марки Зпс за период по 16 технологическим факторам (technological factor –  $tf$ ) сталеплавильного и прокатного производств (табл. 1).

В работе использовались специально созданные математические модели для построений математических зависимостей, формул и проверки полученных результатов. В частности, сделана попытка решить прикладную задачу по влиянию  $tf$  на отсортировку для дальнейшей обработки по поверхностным дефектам при производстве квадратной заготовки.

сталлов участки ещё жидкого металла будут опускаться вниз, поставляя включения на нижние горизонты слитка, а небольшое поперечное сечение слитка и высокая эффективность тепловой работы головной части слитка обеспечат большую скорость восходящего потока в центре слитка, что будет способствовать уносу включений на верхние горизонты. Нисходящий поток переносит вниз мелкие свободно растущие кристаллы, возникающие на открытой поверхности, перед фронтом начала кристаллизации и в двухфазной зоне. В нижней части слитка накапливается богатая примесями жидкость и мелкие свободно растущие кристаллы. В процессе их роста жидкость нагревается, переохлаждение уменьшается, кристаллы растут с малым содержанием примесей, медленно, не разветвляясь и приобретают глобулярную форму. Жидкость между ними еще больше обогащается примесями. Когда жидкость пересыщается кислородом и раскислителем, в ней образуется большое количество неметаллических включений.

Если рассматривать распределение сульфидов по горизонтам слитка, то можно заметить, что на верхнем и нижнем горизонте их количество уменьшается от поверхности к оси слитка, а на среднем горизонте – увеличивается. Уменьшение количества сульфидов на верхнем горизонте и увеличение на среднем можно объяснить следующим образом. В верхней части изложницы к моменту окончания затвердевания образуется мост плотного металла, в результате чего в центре слитка образуется изолированный от прибыльной части объем жидкого металла, который затвердевает в самых неблагоприятных условиях, в результате чего происходит обогащение границ вторичной раковины неметаллическими включениями, таким образом, сульфиды остаются на среднем горизонте.

Если рассматривать распределение оксидов на нижнем горизонте слитка, то можно заметить, что их количество увеличивается от поверхности к оси слитка, оксидные включения, являющиеся центрами кристаллизации, то есть находящиеся внутри тяжелого кристалла, под действием центробежных сил в местах поворота конвективных потоков выталкиваются и оседают в вязких объемах жидкой стали на нижних горизонтах слитка. Часть оксидных включений пытается подняться с восходящими потоками по оси слитка и, поднимаясь на некоторую высоту, снова оседают и образуют конус осаждения оксидных включений в нижней трети слитка.

Анализ параметров литой структуры металла показал, что с увеличением расстояния от бокового края к оси слитка значение межсоснового расстояния на верхнем и среднем горизонте увеличивается, а на нижнем уменьшается. Характер изменения объемной доли дендритов имеет обратную зависимость от межсоснового расстояния.

Увеличение дендритного параметра на верхнем и нижнем горизонтах связано с тем, что дендритную разветвленность и, в частности, расстояния между осями

дендритов в значительной степени определяют условия затвердевания. Брайан Дж. Чалмерс [25] отмечает, что для конкретного сплава расстояние между осями дендритов довольно хорошо согласуются со скоростью охлаждения. Межсосновые промежутки тем меньше, чем больше скорость охлаждения. Это объясняется тем, что с ростом скорости затвердевания времени для диффузии примеси остается меньше, а с приближением к эвтектическому составу количество оттесняемой примеси возрастает. Следовательно, длина межсосновых промежутков определяется не теплопередачей, а диффузией, и зависит от характеристической толщины диффузионной зоны вокруг растущего дендрита.

Таким образом, поскольку скорость затвердевания металла уменьшается по мере продвижения от бокового края к оси слитка, то будет увеличиваться и междендритное расстояние. Эффективное утепление головной части приводит к уменьшению интенсивности затвердевания головной части слитка и, как следствие, к максимальному увеличению дендритного параметра.

Оценка микроструктуры показала, что в слитке наблюдается видманштеттова ферритная структура. Причем с увеличением расстояния от поверхности раковины игольчатая структура феррита становится более выраженной. Согласно наблюдениям Р.П. Тодорова [25], видманштеттова ферритная структура выражена особо четко в низкоуглеродистых сталях, при высоких скоростях охлаждения и крупном аустенитном зерне. По мере затвердевания интенсивность продвижения твердой фазы уменьшается, межсосновое расстояние возрастает, плотность осей кристаллов увеличивается. В результате создаются благоприятные условия для выделения неметаллических включений в прилегающих к стенкам усадочной раковины слоях металла, что выражается в увеличении общей загрязненности неметаллическими включениями. Увеличение содержания включений в слоях, прилегающих к поверхности вторичной усадочной раковины на верхних горизонтах, становится более выраженным.

Ликвационные колебания концентрации углерода в металле, а не установленное ГОСТом его содержание в стали 3пс являются основной причиной резкого увеличения отсортировки. Изменение содержания углерода в исследуемом диапазоне концентраций оказывает негативное влияние только для средней части заготовки, то есть для минимизации отсортировки в средней части заготовки необходимо создавать условия для препятствия развития ликвационных процессов, инициируемых углеродом. Анализ влияния углерода на отсортировку показал, что в головной и особенно донной части квадратной заготовки ликвационные процессы, инициируемые углеродом, создают необходимые условия для максимизации поверхностных дефектов. Негативное влияние углерода вызвано окислением цементитной фазы по границам зёрен. При длительном нагреве и высокой температуре нагрева поверхностные слои заготовки обезугле-

роживаются, то есть происходит пережог. В результате чего поверхностный слой охрупчивается, что вызывает поверхностные дефекты.

Для донной и головной части заготовки увеличение содержания марганца (во всём концентрационном интервале его содержания в стали 3пс) приводит к повышению процента отсортровки, а для средней части заготовки содержание марганца в исследуемой стали не должно превышать 0,915 %. Негативное влияние марганца на отсортровку для головной, средней и донной частей заготовки достигает максимума при  $\sim 0,923\%$  Mn. При содержании марганца около 0,912% негативное влияние нивелируется другими факторами. Анализ влияния марганца на уровень отсортровки показал, что стабильно негативное влияние данного элемента сохраняется для донной и, в меньшей степени, для головной части заготовки. Для средней части заготовки не наблюдается выраженного негативного влияния марганца. Негативное влияние марганца обусловлено образованием сульфида марганца. Образующаяся на границе зёрен легкоплавкая эвтектика на основе MnS приводит к нарушению когерентной связи межзёренной структуры, что охрупчивает границы зёрен. Исходя из этого, содержание марганца, который связывает серу в соединение MnS, необходимо лимитировать.

#### Результаты технологического и математического анализа

Минимальный уровень отсортровки на зачистку по исследованным поверхностным дефектам: плёны и стружки наблюдаются в средней части квадратной заготовки, а трещины и рванины – в головной. Наибольшее влияние на отсортровку оказывают че-

тыре  $tf$ : 1) температура ОРСС; 2) температура на повалке; 3) содержание марганца; 4) содержание углерода. Остальные  $tf$  практически не оказывают заметного влияния на отсортровку (рис. 1).

Возникаемый температурный градиент по высоте слитка оказывает негативное для головной и донной части заготовки в 3,0-3,5 большее влияние, чем для средней части. Для средней части заготовки данный  $tf$  не оказывает существенного влияния на всём температурном диапазоне. Вероятность получения отсортровки для средней части заготовки в несколько десятков раз меньше по сравнению с остальными частями заготовки. Для выравнивания температуры и, как следствие, снижение уровня отсортровки в донной части заготовки необходимо увеличить температуру на повалке. Однако данное технологическое решение однозначно приведёт к усилению температурного дисбаланса жидкого расплава по высоте изложницы, а также значительно увеличит процент отсортровки в головной и средней части заготовки. Увеличение температуры жидкого металла при разливке стали в изложницы приводит к двум основным негативным последствиям: 1) повышенному газонасыщению расплава; 2) увеличению разницы между объёмом жидкого расплава и закристаллизовавшегося металла. При контакте жидкого расплава с изложницей инициируется процесс газовыделения, что приводит к нарушению кристаллического строения поверхностных слоёв металла и, как следствие, к низкой прочности и повышенной хрупкости. Значительная разница объёмов жидкого и твёрдого металла приводит к развита усадочной раковине и повышенной пористости.

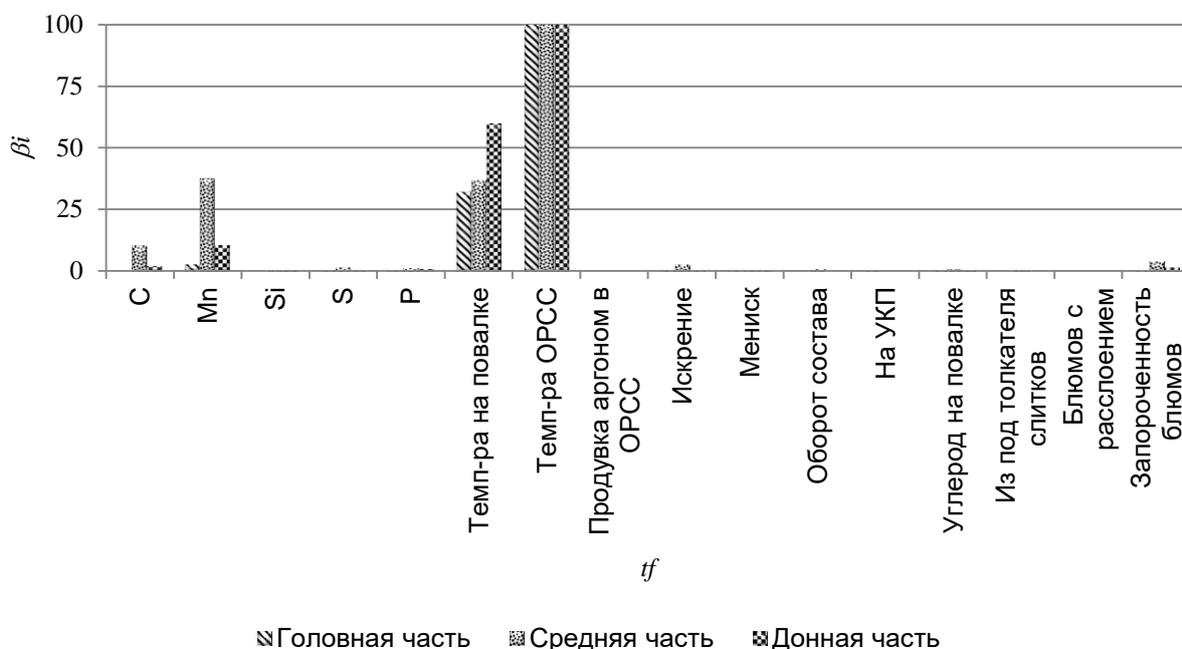


Рис. 1. Нормализованные коэффициенты корреляции  $\beta_i$  исследованных  $tf$  для головной, средней и донной частей заготовки

Технологические рекомендации по оптимизации  $tf$  с целью минимизации уровня отсортировки средней части квадратной заготовки

№ п/п	Наименование $tf$	Значения $tf$			Оптимальное
		Макс.	Ср.	Мин.	
1	Углерод, %	0,210	0,200	0,190	<0,200
2	Марганец, %	0,990	0,921	0,860	<0,915
3	Кремний, %	0,140	0,085	0,050	НВСВ
4	Сера, %	0,049	0,030	0,016	<0,020
5	Фосфор, %	0,034	0,013	0,005	<0,010
6	Температура на повалке, °С	1671	1648	1600	<1647
7	Температура ОРСС, °С	1570	1558	1551	<1557
8	Продувка аргоном в ОРСС, мин	10,0	0,3	0	МинДТ
9	Искрение, с	40	21	15	НВСВ
10	Мениск	ВП	ВГ	СВ	СВ
11	Оборот состава, кол-во/сутки	2,930	1,406	0	ТДИ
12	На УКП, мин	272	57	0	МинДТ
13	Углерод на повалке, %	0,194	0,053	0,027	<0,050
14	Из-под толкателя слитков, кол-во	24,00	6,420	0	МинДТ
15	Блюмов с расслоением, кол-во	23,00	1,24	0	МинДТ
16	Запор. блюмов дефектами, %	81,0	67,1	53,0	МинДТ

Примечание. НВСВ – не выявлено существенного влияния; ТДИ – требуются дополнительные исследования; МинДТ – минимально допустимое (технологически) значение  $tf$ ; ВП – выпуклый; ВГ – вогнутый; СВ – слегка вогнутый.

Корреляции головной и донной части заготовки имеют противоположный знак, что однозначно свидетельствует о существенных ликвационных процессах по высоте квадратной заготовки, приводящих к значительному загрязнению головной и особенно донной части заготовки неметаллическими и интерметаллическими соединениями различной морфологии и химического состава.

Установлены три основные разновидности характера/типа зависимостей между отсортировкой и  $\beta_i$ : 1) прямо пропорциональная; 2) нейтральная; 3) обратно пропорциональная. Первый тип зависимости показывает, что  $tf$  способствует увеличению уровня отсортировки, остальные два типа зависимости не оказывают существенного негативного влияния на брак.

Первый тип зависимости характерен для шести  $tf$ : «Углерод», «Марганец», «Сера», «Температуры в ОРСС», «Продувка аргоном в ОРСС», «Оборот состава». Колебания в значениях данных  $tf$  увеличивают уровень отсортировки. Наиболее ярко данное негативное влияние наблюдается для «Серы» и «Температуры в ОРСС».

В исследованном массиве изменение уровня отсортировки средней части квадратной заготовки находится в пределах 8,3-61,9%, среднестатистическое значение – 33,4%. При использовании математического моделирования установлено, что применение оптимальных значений  $tf$  позволит снизить уровень отсортировки на зачистку средней части квадратной заготовки до 23,3%, то есть примерно на 10%.

### Обсуждение результатов

Основной причиной высокого уровня отсортировки является наличие значительного температурного градиента по высоте слитка и, как следствие, развитие ликвационных процессов в результате неравномерного распределения углерода и образования неметаллических включений.

На развитие зональной неоднородности большое влияние оказывает высота и сечение слитка, и чем они больше, тем сильнее развивается макроликвация. Геометрические параметры (H/D) и конусность изложницы практически полностью определяют уровень отсортировки, а также зональное строение и структурные особенности затвердевающего слитка. Управление этими параметрами обеспечивает возможность получения заготовок (слитка) с заданной структурой и контролируемым расположением дефектов и, как следствие, снижением уровня отсортировки.

С целью минимизации уровня отсортировки в средней части квадратной заготовки предложены технологические рекомендации по оптимизации большинства  $tf$  (табл 2).

Оптимизацию всех  $tf$  (см. табл. 1) с целью минимизации уровня отсортировки в головной и донной частях квадратной заготовки осуществить невозможно по причине возникаемого значительного температурного градиента и развития ликвационных процессов по высоте слитка.

В исследованном массиве изменение уровня отсортировки средней части квадратной заготовки находится в пределах 8,3–61,9%, среднестатистическое значение – 33,4%. При использовании математического моделирования установлено, что применение указанных в табл. 2 оптимальных значений  $tf$  позволит снизить уровень отсортировки на зачистку средней части квадратной заготовки до 23,3%, то есть примерно на 10%.

Методами математического и металлургического анализа однозначно установлены основные физические причины высокого уровня отсортировки, такие как наличие значительного температурного градиента по высоте слитка и, как следствие, развитие ликвационных процессов в результате неравномерного распределения углерода и образования неметаллических включений. Ликвационные колебания концентрации углерода в металле, а не установленное ГОСТом его

содержание в стали 3пс являются основной причиной резкого увеличения отсортировки. Анализ влияния углерода на отсортировку показал, что в головной и особенно донной части квадратной заготовки ликвационные процессы, инициируемые углеродом, создают необходимые условия для максимизации поверхностных дефектов. Негативное влияние углерода вызвано окислением цементитной фазы по границам зёрен. При длительном нагреве и высокой температуре нагрева поверхностные слои заготовки обезуглероживаются, то есть происходит пережог. В результате чего поверхностный слой охрупчивается, что вызывает поверхностные дефекты.

Наибольшее влияние на отсортировку оказывают четыре технологических фактора: температура ОРСС, температура на повалке, содержание марганца и содержание углерода.

Возникаемый температурный градиент по высоте слитка/изложницы оказывает негативное для головной и донной частей заготовки в 3,0-3,5 большее влияние, чем для средней части. Вероятность получения отсортировки для средней части заготовки в несколько десятков раз меньше по сравнению с остальными частями заготовки. Исходя из этого, по полученным результатам исследований для головной и донной частей слитка оптимизацию провести невозможно, что связано со значительным температурным градиентом и развитием ликвационных процессов по высоте слитка.

Увеличение температуры жидкого металла при разливке стали в изложницы приводит к двум основным негативным последствиям: повышенному газонасыщению расплава и увеличению разницы между объёмом жидкого расплава и закристаллизовавшегося металла. При контакте жидкого расплава с изложницей инициируется процесс газовыделения, что приводит к нарушению кристаллического строения поверхностных слоёв металла и, как следствие, к низкой прочности и повышенной хрупкости. Значительная разница объёмов жидкого и твёрдого металла приводит к развитой усадочной раковине и повышенной пористости.

Проведенный анализ выявил некоторые несоответствия с классическими представлениями физико-химических процессов, протекающих при кристаллизации слитка. Например, математическим анализом установлено, что оптимальным является слегка вогнутый мениск. Получение единичных противоречивых результатов, возможно, свидетельствует о некорректно предоставленных статистических данных для исследования технологических факторов, поэтому математическая модель не может обеспечить оптимальные значения параметров для выплавки и разливки стали в изложницы в конкретно заданных пределах.

Установленные коррективы технологического процесса разливки с целью минимизации уровня отсортировки требуют дополнительных исследований, так как полученные в настоящее время закономерно-

сти не дают достаточно полное понимание технологических причин высокого уровня отсортировки, а также могут привести к увеличению отсортировки по головной и/или донной частям, что связано со значительным перепадом температур по высоте слитка и наличием ликвационных процессов, как это уже отмечалось выше.

### Выводы

1. Отрицательная ликвация углерода, серы и фосфора отмечена как в нижнем, так и в верхнем (подприбыльном) сечении слитка в области моста плотного металла. В прибыльной части слитка содержание этих элементов возрастает.

2. Изменение химического состава по оси слитка, 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.

3. Анализ результатов общей загрязнённости литого металла различными видами включений показал, что преобладающим видом включений являются окисульфиды, а затем по степени убывания – сульфиды и оксиды.

4. Анализ параметров литой структуры металла показал, что с увеличением расстояния от бокового края к оси слитка значение межосного расстояния на верхнем и среднем горизонте увеличивается, а на нижнем уменьшается. Характер изменения объёмной доли дендритов имеет обратную зависимость от межосного расстояния.

5. Оценка микроструктуры показала, что в слитке наблюдается видманштеттова ферритная структура. Причем с увеличением расстояния от поверхности раковины игольчатая структура феррита становится более выраженной.

6. По мере затвердевания интенсивность продвижения твердой фазы уменьшается, межосное расстояние возрастает, плотность осей кристаллов увеличивается. В результате создаются благоприятные условия для выделения неметаллических включений в прилегающих к стенкам усадочной раковины слоях металла, что выражается в увеличении общей загрязнённости неметаллическими включениями. Увеличение содержания включений в слоях, прилегающих к поверхности вторичной усадочной раковины на верхних горизонтах, становится более выраженным.

7. Основной причиной распределения ликватов по высоте слитка является различная скорость и условия затвердевания на различных горизонтах слитка.

8. На развитие зональной неоднородности большее влияние оказывает высота и сечение слитка, и чем они больше, тем сильнее развивается макроликвация.

9. Геометрические параметры Н/Д и конусность практически полностью определяют зональное строение и структурные особенности затвердевающего слитка, и

управление этими параметрами обеспечивает возможность получения заготовок с заданной структурой и контролируемым расположением дефектов.

#### Список источников

1. Жульев С.И., Зюбан Н.А. Производство и проблемы качества кузнечного слитка: монография. Волгоград, 2003. 168 с.
2. Дюдкин Д.А., Ксиленко В.В., Смирнов А.Н. Производство стали. Т. 4. Непрерывная разливка металла. М.: Теплотехник, 2009. 528 с.
3. Martin Novak. Production aspects and materials evaluation of the forged nuclear cask from 170 tons bottom poured ingot. Proc. IFM 2009, 18 th International Forgemasters Meeting, Santander, Spain, 3-7. Nov. 2009, P. 1-6.
4. By Yasuto Ikeda, Recent Technological Progress on Large Ingots for Rotor Forgings / By Yasuto Ikeda, Koji Morinaka, Tomohiro Muraoka // 18th International Forgemasters Market and Technical Proceedings September 12-15, 2011 Pittsburgh, PA, USA. P. 166-169.
5. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: учебник для вузов. М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003. 528 с.
6. Изготовление кузнечных слитков без осевых усадочных дефектов / В.В. Назаратин, Л.И. Берман, М.В. Ефимов и др. // *Металлург*. 2012. № 1. С. 39-44.
7. Хворинин Н.И. Кристаллизация и неоднородность стали. М.: Машгиз, 1958. 392 с.
8. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов. М.: Машиностроение, 1998. С. 359.
9. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. М.: Металлургия, 1976. С. 552.
10. Зюбан Н.А. Создание технологии производства крупных кузнечных слитков с улучшенными свойствами на основе управления параметрами слитка и процессами разливки стали в вакууме: дис. ... д-ра техн. наук. Волгоград: ВолгГТУ, 2005. 302 с.
11. Влияние геометрии слитка на объем осевой рыхлости в нем / А.Н. Ромашкин, А.Н. Мальгинов, Д.С. Толстых [и др.] // *Электрометаллургия*. 2013. № 7. С. 36-39.
12. Изучение влияния конфигурации кузнечных слитков на распределение химических элементов по их сечению / В. С. Дуб, А. Н. Ромашкин, А. Н. Мальгинов, И. А. Иванов [и др.] // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2014. № 1. С. 5-18.
13. Титов К.Е. Совершенствование технологии жидкотвердой разливки крупных кузнечных слитков из конструкционной стали для ответственных изделий: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВМИ, 2004. 140 с.
14. Бузинов Е.И. Исследование кристаллизации, макроструктуры, дефектов напряженного состояния кузнечных слитков для изделий тяжелого машиностроения с использованием систем компьютерного моделирования и автоматизированного проектирования: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград: ВолгГТУ, 2005. 171 с.
15. Федоров Д.Н., Жульев С.И., Мозговой А.В. Разработка геометрии кузнечного слитка для полых поковок // *Технология машиностроения*. 2008. № 4. С. 9-12.
16. Скобло С.Я., Казачков Е.А. Слитки для крупных поковок. М.: Металлургия, 1973. 248 с.
17. Камнев П.В. Совершенствованиековки крупных поковок. Л.: Машиностроение, 1975. 342 с.
18. Вейник А.И. Теплообмен между слитком и изложницей. М.: Металлургиздат, 1959. 358 с.
19. Федоров Д.Н. Исследование усадочных дефектов в удлиненных сдвоенных бесприбыльных слитках и их использование для производства крупных полых поковок: дис. ... канд. техн. наук. М.: ЦНИИЧЕРМЕТ, 2005. 166 с.
20. Моделирование напряженного состояния стальных слитков при затвердевании / С.И. Жульев, Е.И. Бузинов, К.Ю. Бод [и др.] // *Сталь*. 2006. № 7. С. 21-22.
21. Рущкий Д.В. Исследование химической неоднородности кузнечных слитков для крупногабаритных заготовок тяжелого машиностроения: дис. ... канд. техн. наук. М.: ЦНИИТМАШ, 2006. 134 с.
22. Посламовская Ю.А., Жульев С.И. Особенности формирования нижней части крупных кузнечных слитков Cr-Ni-Mo сталей // *Металлург*. 2008. № 4. – 67-70.
23. Рущкий Д.В., Жульев С.И., Титов К.Е. Ликвация в крупных кованных изделиях // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2008. № 2. С. 21-27.
24. Чалмерс Б. Теория затвердевания: пер. с англ. М.: Металлургия, 1968. 288 с.
25. Тодоров Р.П., Христов Хр.Г. О виндманштеттовых структурах углеродистых сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2004. № 2. С. 3-7.

#### Сведения об авторах

**Великоцкий Роман Евгеньевич** – начальник патентного отдела, ООО «Южный горно-металлургический комплекс», Алчевск, ЛНР. E-mail: vr@ro.ru

**Сумец Андрей Викторович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры машиностроения и строительства, Северодонецкий технологический институт, Филиал ВО «ЛГУ им. В. Даля», Северодонецк, ЛНР.

**Шабрацкий Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, зав. кафедры машиностроения и строительства, Северодонецкий технологический институт, Филиал ВО «ЛГУ им. В. Даля», Северодонецк, ЛНР.

**Малахида Владимир Семенович** – преподаватель кафедры машиностроения и строительства Северодонецкий технологический институт, Филиал ВО «ЛГУ им. В. Даля», Северодонецк, ЛНР.

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**METAL ANALYSIS OF THE REASONS FOR SORTING FOR SURFACE CLEANING OF A SQUARE BLANK OF 3PS STEEL WITH ELEMENTS OF MATHEMATICAL MODELING**

**Velikotsky Roman E.** – head of patent department «Limited liability company» Southern Mining and Metallurgical Complex

**Sumets Andrey V.** – candidate of technical sciences, Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering and Construction, Severodonetsk Technological Institute, Severodonetsk

**Shabratsky Sergey V.** – candidate of technical sciences, head of Department Mechanical Engineering and Construction, Severodonetsk Technological Institute, Severodonetsk

**Malakhida Vladimir S.** – Lecturer Department of Mechanical Engineering and Construction, Severodonetsk Technological Institute, Severodonetsk

**Abstract.** The work analyzes the influence of technological parameters on sorting for cleaning the surface of a square workpiece and the development of recommendations for minimizing the level of sorting for surface defects of 3ps steel. Negative segregation of carbon, sulfur and phosphorus was noted in both the lower and upper (sub-profit) sections of the ingot in the area of the dense metal bridge. In the profitable part of the ingot, the content of these elements increases. The change in the chemical composition along the axis of the ingot shows that with increasing height of the ingot, the distribution of liquids is non-uniform. In the lower part, the content of liquids is lower than the steel grade composition; with increasing ingot height, their content gradually increases, reaching a maximum in the profitable part. Analysis of the results of general contamination of cast metal with various types of inclusions showed that the predominant type of inclusions are oxysulfides, and then, in decreasing order, sulfides and oxides. Analysis of the parameters of the cast metal structure showed that with increasing distance from the side edge to the ingot axis, the value of the interaxial distance on the upper and middle horizons increases, and on the lower one decreases. The nature of the change in the volume fraction of dendrites has an inverse relationship with the interaxial distance. An assessment of the microstructure showed that the ingot exhibits a Widmanstätten ferrite structure. Moreover, with increasing distance from the surface of the shell, the needle-like structure of ferrite becomes more pronounced. As solidification progresses, the intensity of movement of the solid phase decreases, the interaxial distance increases, and the density of the crystal axes increases. As a result, favorable conditions are created for the release of non-metallic inclusions in the metal layers adjacent to the walls of the shrinkage cavity, which is expressed in an increase in the overall contamination with non-metallic inclusions. The increase in the content of inclusions in the layers adjacent to the surface of the secondary shrinkage cavity in the upper horizons becomes more pronounced. The main reason for the distribution of liquids along the height of the ingot is the different speed and conditions of solidification at different horizons of the ingot. The development of zonal heterogeneity is greatly influenced by the height and cross-section of the ingot, and the larger they are, the stronger the development of macrosegregation. The geometric parameters H/D and taper almost completely determine the zonal structure and structural features of the solidifying ingot, and control of these parameters makes it possible to obtain workpieces with a given structure and controlled location of defects.

**Key words:** 3ps steel, sorting for stripping, segregation processes, macrosegregation, square billet, geometric parameters and mold taper.

---

Ссылка на статью:

Металловедческий анализ причин отсортировки на зачистку поверхности квадратной заготовки стали 3ПС с элементами математического моделирования / Великоцкий Р.Е., Сумец А.В., Шабрацкий С.В., Малахида В.С. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №2(49). С. 49-58.

Velikotsky R.E., Sumets A.V., Shabratsky S.V., Malakhida V.S. Metal analysis of the reasons for sorting for surface cleaning of a square blank of 3PS steel with elements of mathematical modeling. *Teoria i tehnologija metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 49, no. 2, pp. 49-58.